



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**NÁVRHOVÝ VÝPOČET EXPERIMENTÁLNÍ STRIPOVACÍ
JEDNOTKY**

DESIGN CALCULATION OF AN EXPERIMENTAL STRIPING UNIT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tibor Florian

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Touš, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Bc. Tibor Florian**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Procesní inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Michal Touš, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrhový výpočet experimentální stripovací jednotky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá návrhem experimentální stripovací jednotky pro účely separace amoniaku z čpavkové vody. Práce je vhodná pro studenta, který chce uplatnit znalosti procesního inženýra při řešení praktické úlohy. Výsledky by měly sloužit jako podklad pro stavbu experimentální jednotky.

Cíle diplomové práce:

- rešerše v oblasti výpočtů k návrhu stripovací jednotky
- sestavení výpočtové procedury
- návrh experimentální jednotky dle zadání

Seznam doporučené literatury:

MÍKA, V.. Základy chemického inženýrství. 2. nezměn. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit., 1981.

SEADER, J. D. a E. J. HENLEY. Separation process principles. 2nd ed. Hoboken: John Wiley, 2006. ISBN 978-0471464808.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Hlavní náplní této diplomové práce je vytvoření návrhu stripovací kolony, která splňuje stanovená omezení. V úvodní části je uveden popis kontaminantu, v tomto případě amoniaku, který je odstraňován z čpavkové vody. Následující pasáž se věnuje stripování a stripovacím kolonám v obecné rovině, tedy principu, jejich možnostem a omezením apod. Hlavní částí je již samotný výpočetní návrh jednotky, který obsahuje i zjednodušené konstrukční řešení pro možnou stavbu. Součástí práce je také výkresová dokumentace.

Klíčová slova

Amoniak, stripování, stripovací kolona, desorpce.

Abstract

The aim of this diploma thesis is to design a stripping column according to given requirements. At the beginning, the contaminant is described, in this case ammonia. Next section is putting emphasis on stripping columns, the principle, possible construction options etc. The main part of this thesis is focused on the design itself, including calculation of various parameters as well as simplified construction possibility. Drawing documentation is included in the attachment.

Key words

Ammonia, stripping, stripping column, desorption.

Bibliografická citace

FLORIAN, Tibor. Návrhový výpočet experimentální stripovací jednotky. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129483>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Michal Touš.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Návrhový výpočet experimentální stripovací jednotky vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Michalu Toušovi, Ph.D. za čas, cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracovávání práce. Dále děkuji své rodině, která mi poskytla optimální podmínky pro studium.

Obsah

Úvod.....	3
1 Amoniak	5
1.1 Výskyt v přírodě	5
1.2 Výroba	5
1.3 Využití	6
1.4 Rizika pro zdraví a životní prostředí	6
1.5 Amoniak v legislativě	7
2 Stripování	9
2.1 Princip.....	9
2.1.1 Fázová rovnováha	9
2.1.2 Difuze	11
2.1.3 Difuzní koeficienty	12
2.1.4 Filmová teorie	13
2.1.5 Koeficient prostupu hmoty	19
2.1.6 Bilance kolony.....	21
2.1.7 Stripovací faktor	23
2.1.8 Koncept NTU a HTU	23
2.1.9 Průměr kolony	25
2.1.10 Faktory ovlivňující stripování amoniaku	27
2.2 Typy kolon.....	29
2.2.1 Patrové kolony.....	30
2.2.2 Plněné kolony	34
2.2.3 Další vnitřní vybavení	36
3 Návrhový výpočet	41
3.1 Henryho konstanta	41
3.2 Stripovací faktor	42
3.3 Množství plynu	43
3.4 Průměr kolony	43
3.5 Tlaková ztráta	45
3.6 Celkový koeficient prostupu hmoty	47
3.7 Výška výplně	48
3.8 Shrnutí výsledků	48
3.9 Provedení výpočtu	49
4 Konstrukční návrh	51
4.1 Obal kolony	51
4.2 Vstupy a výstupy médií	52
4.3 Distributory médií.....	53
5 Závěr.....	57
Seznam použitých symbolů a zkratek	65
Seznam obrázků	68
Seznam tabulek	69
Seznam příloh.....	70

Úvod

Pojem separace amoniaku může pro širokou veřejnost vyznít nezajímavě až zbytečně. Opak je nicméně pravdou. Nejde totiž jen o plyn, případně vodný roztok, který je charakteristický svým zápachem, nýbrž i o látku, která je klasifikovaná jako toxická a nebezpečná pro životní prostředí. V řadě provozů je ale právě tato látka obsažena v odpadních vodách, čímž může kvůli svým zmíněným vlastnostem zabránovat jejich vypouštění do kanalizace či povrchových.

Tento problém vyvstává při zpracování fugátu (odpadní voda z bioplynových stanic) v odparce. Fugát je považován za kvalitní hnojivo, a tak se běžně aplikuje na pole. Je ovšem produkován ve velkých objemech a cca 95 % hm. tvoří voda. Cílem odpařování je tedy redukovat množství vody ve fugátu a tím snížit jeho objem tak, aby se ušetřilo na nákladech na aplikaci. Fugát však obsahuje velké množství amoniaku, který se při odpařování dostává do destilátu. Tím je prakticky znemožněno destilovanou vodu vypouštět do povrchových vod nebo ji jinak využít (např. na oplach techniky apod.).

V průběhu let byly zavedeny postupy, jak amoniak z roztoků separovat. Těch je v současné době vícero. Lze je dělit např. dle principu na biologické, chemické, fyzikální a kombinované. Často využívaným řešením je proces stripování, který spadá do fyzikální kategorie. Ten byl zároveň zvolen k řešení výše zmíněného problému, jenž je řešen v rámci výzkumu v Laboratoři energeticky náročných procesů (LENP), která je součástí NETME Centra patřícího pod Fakultu strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Od toho se odvíjí i hlavní cíl této diplomové práce – návrhový výpočet stripovací jednotky pro čištění čpavkové vody.

První kapitoly jsou věnovány základním informacím o amoniaku. Zabývají se amoniakem z hlediska jeho vlastností, výroby či vztahu k legislativě a emisním limitům. Zmíněny jsou také možnosti jeho využití v praxi. Druhá část se věnuje samotnému procesu stripování. Je popsán princip, na kterém funguje, a konstrukční možnosti zařízení. Drtivou většinu představují patrové a plněné kolony, přičemž tato práce je zaměřena na druhý jmenovaný typ. Hlavní částí je pak návrhový výpočet, který má za cíl stanovit především rozměry stripovací kolony s ohledem na stanovená omezení v podobě velikosti či tlakové ztráty. Samotná metodika výpočtu je založena na odborných člancích a literatuře, která se této problematice věnuje. V závěru je proveden základní konstrukční návrh.

1 Amoniak

Amoniak, známý též pod svým triviálním názvem čpavek, je bezbarvý plyn, který je charakteristický pro svůj štiplavý zápach. Je silně korozivní vůči kovům, hlavně pak ke slitinám mědi. V tabulce níže jsou uvedeny základní parametry této molekuly.

Tab. 1 Základní parametry amoniaku [1]

Parametr	Hodnota
Sumární vzorec	NH ₃
Molární hmotnost	17,03 g / mol
Molární objem	24,96 cm ³ / mol
Teplota tání	-77,7 °C
Teplota varu	-33,4 °C
Kritická teplota	132,4 °C
Teplota samovznícení	630,0 °C
Hranice výbušnosti	15-30 % obj.

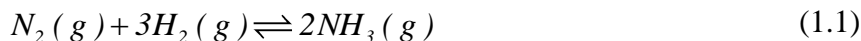
1.1 Výskyt v přírodě

Molekuly amoniaku jsou v přírodních podmínkách součástí koloběhu dusíku. Jde o komplexní cyklus, který zobrazuje přeměnu dusíku v přírodě, přičemž esenciálním prvkem tohoto koloběhu jsou organismy. Amoniak v tomto cyklu vzniká amonizací (amonifikací), kdy dochází k odumírání rostlinných a živočišných těl, mikroorganismů a produktů jejich metabolismu, zejména bílkovin [1]. K tomu napomáhají tzv. amonizační bakterie, což jsou v podstatě houby a bakterie.

1.2 Výroba

První metody na výrobu syntetického amoniaku se objevily na počátku 20. století. Šlo o odpověď na poptávku, která pramenila z touhy produkovat z této látky výbušniny a hnojiva. Byly totiž obavy, že v té době používané způsoby získávání amoniaku (těžba ledku) nebudou dostačovat. Průlomový byl proces od německých vědců Fritze Habera a Carla Bosche. Ti představili způsob produkce z atmosférického dusíku při reakci s vodíkem za vysokých teplot (400–450 °C) a tlaků (cca 20 MPa) a přítomnosti kovového katalyzátoru, za který oba získali Nobelovu cenu. Vysoké teploty obecně slouží k posunutí rovnováhy na endotermickou stranu, přičemž vznik amoniaku je exotermní. Mohlo by se tedy zdát logické provozovat proces za nižších teplot. To by sice mělo za následek vyšší výtěžek z reakce, na druhou stranu by se ale snížila její rychlost. Zmíněné teploty jsou tedy kompromisem mezi těmito dvěma parametry. Vyšší tlaky pak posouvají rovnováhu reakce směrem, který obsahuje méně molekul. Zároveň se i zvyšuje rychlost, jelikož jsou molekuly reaktantů blíže sobě a častěji tedy dochází ke srážkám mezi nimi. Tato reakce, která je reverzibilní a v případě produkce amoniaku, jak již bylo zmíněno, exotermní, je zobrazena v rovnici (1.1). Nezreagovaný materiál je zároveň

recyklován. Oproti jiným soudobým metodám měla výhodu jednodušší průmyslové výroby a vyšší efektivity.



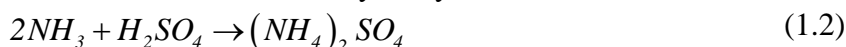
Od této doby se metody výroby syntetického amoniaku ve všech směrech posunuly kupředu. Stále jsou ale ve většině případů postaveny na procesu Haber-Bosch. Dominantní postavení ve smyslu technologického know-how mají 3 společnosti, a to KBR, Haldor Topsøe a TKIS [2]. Všechny využívají v podstatě stejného principu, který se skládá z těchto kroků:

- příprava syntézního plynu,
- komprese syntézního plynu,
- vlastní syntéza amoniaku.

1.3 Využití

Hlavní uplatnění amoniak, spolu se svými sloučeninami, nalézá v zemědělství. V tomto odvětví se totiž používá jako hnojivo. K takovým základním hnojivům patří např. dusičnan amonný (NH_4NO_3) či síran amonný ($(NH_4)_2SO_4$). První jmenovaná bílá krystalická látka pokrývá přibližně čtvrtinu světové spotřeby dusíku, vyrábí se jej cca 20 mil. tun ročně. Slouží k regeneraci plodin a udržení potřebné hladiny dusíku během vegetace. Vyrábí se neutralizací 50-60% kyseliny dusičné pomocí plynného amoniaku. Protože je tato reakce exotermní, uvolněné teplo je využito k odpaření vody z reakční směsi.

Síran amonný je pak už méně významnou látkou v oblasti agrikultury, zaujímá kolem 6 % spotřeby dusíkatých hnojiv a tato hodnota v poslední době stále klesá [3]. Vzniká podobným způsobem jako předchozí sloučenina, a to neutralizací kyseliny sírové amoniakem.



Další možností je i přímá aplikace zavlažováním ve formě vodného roztoku, což je nejkoncentrovanějším dusíkatým hnojivem. Jeho výhodou jsou nízké náklady, a to jak výrobní, tak i manipulační [4]. Díky svým fungicidním vlastnostem se také používá jako postřik na ovocné plody, kde zabraňuje růstu parazitních hub a plísní.

Dalšími alternativami, kde se amoniak rovněž prosazuje, je např. jako chladicí medium, a to nejen v ledničkách či mrazicích boxech, ale i v prostorných zimních stadionech, součást čistících prostředků, palivo některých motorů, či komponenta pro výrobu polymerů nebo kaučuků [5]. V neposlední řadě jej lze využít jako redukční činidlo k likvidaci NO_x .

V poslední době se také o této látce uvažuje jako o palivu budoucnosti, především pro lodě a letadla. Oproti konvenčním palivům totiž představuje výhodu v podobě absence CO_2 jako emise (odvíjí se od způsobu výroby). V porovnání s dalším „zeleným“ palivem, vodíkem, je jednodušší na uskladňování a může být použit ve standardních spalovacích motorech [6], [7].

1.4 Rizika pro zdraví a životní prostředí

Amoniak s sebou nese i zdravotní rizika, jelikož se jedná o toxickou látku. V nízkých koncentracích dráždí dýchací cesty nebo oči. Při vzrůstajících koncentracích může docházet k zánětům, zavedení plic, vážným dýchacím potížím. Dlouhodobá expozice pak může mít za následek např. zelený zákal nebo onemocnění rohovky a v kapalně formě je schopen způsobit i omrzliny. Je-li koncentrace vyšší než cca $3,5 \text{ g/m}^3$, účinky mohou být až smrtelné. V každodenním životě jsou ale koncentrace na tak nízké úrovni, že rizika jsou minimální. Je-li zvýšená, dá se poměrně jednoduše zaznamenat svým charakteristickým zápachem. Člověk je

s touto látkou nejčastěji vystaven při používání čisticích prostředků nebo na farmách, kde vzniká rozkladem močoviny.

Jak již bylo zmíněno, NH_3 je toxická látka, která má z hlediska životního prostředí velký dopad především na vodní organismy. To je zapříčiněno i jeho velmi dobrou rozpustností ve vodě (cca 700 g/100 ml při teplotě 20 °C). Je-li ale ve vodě dostatečné množství kyslíku, dochází k jeho oxidaci a přeměně na dusičnany, které už tak negativní chování nemají. Pokud je přítomna vyšší koncentrace amoniaku v půdě, např. kvůli nadměrnému hnojení, může to mít za následek kontaminaci podzemních vod, které se pak stanou pro člověka nevhodné, případně se musí čistit. Z hlediska výskytu v ovzduší je látka součástí fotochemického smogu, který vzniká spalováním fosilních paliv – tedy v elektrárnách a teplárnách, ale i v motorech. Tento jev se tedy týká především měst [5].

1.5 Amoniak v legislativě

Z hlediska legislativy ČR je amoniak a jeho vztah k znečišťování obsažen v zákoně č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší a ve vyhlášce č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím znečišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. Zmíněný zákon je sestaven s tím účelem, aby byla „...omezena rizika pro lidské zdraví způsobená znečištěním ovzduší, snížení zátěže životního prostředí látkami vnášenými do ovzduší a poškozujícími ekosystémy a vytvoření předpokladů pro regeneraci složek životního prostředí postižených v důsledku znečištění ovzduší.“ [8] V příloze č. 2 je uvedeno, že podle druhu stacionárního zdroje je vyžadováno:

- a) rozptylová studie podle zákona č. 201/2012 Sb. § 11 odst. 9,
- b) kompenzační opatření podle č. 201/2012 Sb. § 11 odst. 5,
- c) provozní řád jako součást povolení provozu dle č. 201/2012 Sb. § 11 odst. 2 písm. d).

Rozsah zainteresovanosti amoniaku v tomto smyslu je znázorněn ve zjednodušené Tab. 2.

Tab. 2 Povinnosti provozovatele zdroje [9]

Kód	Popis	Povinnost
6.16.	Výroba amoniaku	a), b)
8.	Chovy hospodářských zvířat s celkovou projektovou roční emisí amoniaku nad 5 t včetně	c)
11.5.	Ostatní stacionární zdroje, jejichž roční emise amoniaku překračuje 5 t	a), b)

Maximální dovolené množství emisí je stanoveno příslušnými předpisy Evropské unie, které jsou zapracovány do zmíněné vyhlášky č. 415/2012 Sb. České republiky. Obecné emisní limity jsou stanoveny za podmínek při tlaku 101,325 kPa a teplotě 273,15 K ve vlhkém plynu. Dále platí, že během měření musí být postupováno dle určených technických norem dle zákona o technických požadavcích na výrobky. V případě specifických emisních limitů nesmí hodnota 95% intervalu spolehlivosti intervalu jednotlivého naměřeného výsledku překročit 20% podíl specifického emisního limitu [9]. Rozdíl mezi uvedenými limity je následující:

- Obecný emisní limit – maximální možné znečištění. V případě amoniaku se jedná o koncentraci 50 mg/m³ při hmotnostním toku větším než 500 g/h, jak je stanoveno v příloze č. 9 k vyhlášce č. 415/2012 Sb.

- Specifický emisní limit – maximální znečištění zdroje dané na základě žádosti o povolení k provozu, které určuje vyhláška, nebo krajský úřad. Pokud jej vydává krajský úřad, jeho hodnota nesmí být vyšší než ta, která je stanovena ve vyhlášce.

Dle přílohy č. 8 k vyhlášce č. 415/2012 Sb. popisující podmínky provozu pro ostatní stacionární zdroje jsou předloženy v Tab. 3 jednotlivé specifické emisní limity [9].

Tab. 3 Specifické emisní limity amoniaku

Kategorie	Popis	Emisní limit	Vztažné podmínky
2.4.1.	Zplyň. nebo zkap. uhlí, výroba nebo rafinace plynů, minerálních nebo pyrolýzních olejů, energetických nebo syntézních plynů	50 mg/m ³	a)
5.2.6.	Výroba amoniaku	0,2 kg/t ¹⁾	c)
5.2.7.	Výroba kyseliny dusičné a jejích solí	300 mg/m ³ ²⁾	c)
5.2.8.	Výroba hnojiv	50 mg/m ³	b)

¹⁾ Zjištěno z měsíčního průměru výroby

²⁾ V případě selektivní redukce oxidů dusíku amoniakem

Uvedené vztažné podmínky pak mají následující znění:

- a) koncentrace příslušné látky při normálních stavových podmínkách v suchém plynu, někdy s udáním referenčního obsahu některé látky v odpadním plynu, obvykle kyslíku,
- b) koncentrace příslušné látky ve vlhkém plynu za normálních stavových podmínek, někdy s udáním referenčního obsahu některé látky v odpadním plynu, obvykle kyslíku,
- c) koncentrace příslušné látky v odpadním plynu za obvyklých provozních podmínek.

2 Stripování

Stripování je proces patřící mezi esenciální operace v chemickém a petrochemickém odvětví. V mnoha případech je zakomponován v procesu spolu s destilací. Je založený na principech přestupu hmoty, kdy dochází k separaci znečišťující těkavé látky z kapaliny pomocí procházejícího plynu, kterým bývá obvykle vzduch, vodní pára nebo kouřové plyny, obsahující cca 10 % oxidu uhličitého. Volba plynu se odvíjí od čistěné sloučeniny. Nejpoužívanější je vzduch, vodní páru je možno brát v úvahu pro stripování fenolů a jejich derivátů, kouřový plyn pak při okyselení vody [10].

Ke stripování se využívá dvou zařízení – kolon a aerátorů. Volba jednoho z nich závisí především na požadovaném stupni odstranění znečišťující látky a její Henryho konstantě. Je-li požadována vysoká výstupní čistota kapaliny nebo je Henryho konstanta nízká, volí se možnost kolony. Na druhou stranu aerátory jsou vhodné za předpokladu nižších nároků na čistotu nebo při vysoké Henryho konstantě, tedy afinita plynu k vodě je nízká.

2.1 Princip

Následující odstavce a kapitoly popisují fundamentální principy a mechanismy stripování. Cílem je získání všeobecného přehledu, který bude dále sloužit pro konstrukci výpočetního postupu a jeho řešení.

2.1.1 Fázová rovnováha

Při stripování dochází ke kontinuálnímu kontaktu plynného a kapalného skupenství, kdy určitá část látky přechází z jedné fáze do druhé. Přitom dochází k rovnováze, při které musí být splněna podmínka, že chemické potenciály složky v obou fázích jsou stejné, stejně tak jako jejich diferenciály. Z Lewisovy definice fugacity, viz rovnice (2.1), pak platí, že rovnat se musí i fugacity.

$$d\mu_{cp} = RT \cdot d\ln f' \quad (2.1)$$

Tato rovnováha přetrvává, nejsou-li změněny vnější podmínky. Tlak v této rovnováze se nazývá tenze par. Jde o nejvyšší tlak, při kterém látka existuje v plynném stavu a zároveň nejnižší tlak, při kterém látka existuje v kapalném stavu. Zvyšuje-li se teplota, stoupá kinetická energie molekul a roste i tenze par. Tuto souvislost popisuje Antoineova rovnice [11].

$$\log p = A' - \frac{B'}{C' + T} \quad (2.2)$$

kde:

p	[kPa]	tlak,
A', B', C'	[-]	tabelované konstanty,
T	[K]	teplota.

Závislost tenze par na množství koncentrace látky je možné zjistit dvěma způsoby:

- experimentem,
- výpočtem pomocí Raoultova, Daltonova nebo Henryho zákona.

Raoultův zákon

Raoultův zákon vychází z podmínky rovnosti fugacity složky v plynné a kapalně fázi a obecně platí pro ideální soustavu. Stanovuje, že parciální tlak složky nad kapalinou je roven součinu molárnímu zlomku složky a její tenze par za dané teploty [11].

$$p = p^* \cdot x \quad (2.3)$$

Spojí-li se tento zákon s Daltonovým zákonem, který říká, že suma parciálních tlaků je rovna celkovému tlaku směsi plynů, pak platí:

$$p = p_A + p_B = p_A^* \cdot x_A + p_B^* \cdot x_B \quad (2.4)$$

Tedy, tlak par nad kapalinou, který se skládá ze dvou a více vzájemně mísitelných složek, je součtem parciálních tlaků všech složek.

Henryho zákon

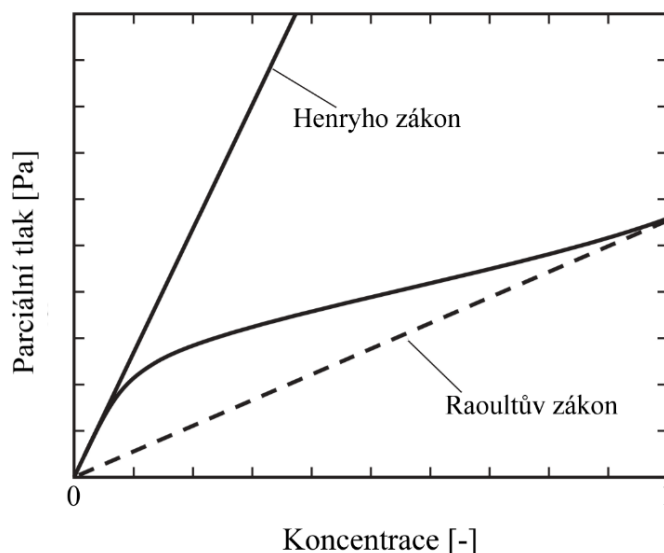
Pro zředěné roztoky, které jsou v přírodních podmínkách běžné, je parciální tlak složky úměrný její molárnímu zlomku. Tento vztah je známý jako Henryho zákon. Vyjadřuje tedy závislost rozpustnosti plynu v kapalinách na parciálním tlaku:

$$p_A = H_A \cdot x_A \quad (2.5)$$

kde:

p_A	[Pa]	parciální tlak složky A nad roztokem,
H_A	[-]	Henryho konstanta,
x_A	[-]	molární zlomek složky A v roztoku.

Tento zákon platí pouze pro fyzikální děje. Je-li zahrnuta chemická interakce mezi složkami, Henryho zákon není postačující a je nutné použití chemické rovnováhy. Grafické srovnání Raoultova a Henryho zákona je zobrazeno na Obr. 1. Z něj je zároveň zřejmé, že zmíněný zákon je relevantní pro nízké koncentrace.



Obr. 1 Srovnání Raoultova a Henryho zákona [12]

Henryho konstanta je pak velmi důležitým prvkem při návrhovém výpočtu stripovací kolony. Slouží totiž jak k určení minimálního průtoku vzduchu, tak i rozměrů kolony. Její rozměr se odvíjí podle použitých jednotek tlaku a koncentrace. Obecně pro Henryho konstantu platí, že se zvyšuje s růstem teploty, a stejně tak i při snižování koncentrace za zachování konstantního

parciálního tlaku látky. Při výpočtech se ve většině případů využívá tabelovaných hodnot, nicméně je možné tuto konstantu určit i pomocí vztahů, jako je např. Van't Hoffův [13]:

$$\log H = \left(\frac{-H^\circ}{RT} \right) + k \quad (2.6)$$

kde:

H	[-]	Henryho konstanta,
H°	[kJ·mol ⁻¹]	změna entalpie vzniklá rozpuštěním složky ve kapalině,
R	[J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹]	univerzální plynová konstanta,
T	[K]	teplota,
k	[-]	konstanta složky.

2.1.2 Difuze

Jak již bylo zmíněno, stripování je založeno na přestupu hmoty, jehož rychlost ovlivňuje vícero parametrů, jako je účinnost odstranění kontaminantu či rozměry zařízení. V obecné definici je přestup hmoty pohyb hmoty z jedné pozice do druhé. Tento pohyb vzniká jako důsledek rozdílu koncentrace látky mezi fázemi, v případě této diplomové práce kapalina – plyn. Hmoty tedy obvykle přestupuje z míst s vyšší koncentrací do míst s nižší koncentrací. Tento proces se nazývá difuze. Ustává ve chvíli, kdy se koncentrace mezi skupenstvími vyrovnají, koncentrační spád tedy zmizí. Difuze může probíhat na bázi dvou mechanismů: molekulární a konvektivní, která je rychlejší [14].

Pro další pochopení difuze může sloužit Brownův pohyb. Jde o neustálý náhodný, chaotický, ale přímočarý pohyb částic v tekutině, který je způsoben jejich vnitřní energií. Rychlost těchto pohybů je přímo úměrná teplotě. Následkem jsou srážky jednotlivých částic mezi sebou, přičemž směr i síla jsou pokaždé jiné. Za předpokladu, že tekutina, ve které jsou uvažované částice, je naprosto nehybná, platí, že pohyb bude z míst vyšší koncentrace částic do míst s nižší koncentrací. V místech vysoké koncentrace je totiž vyšší šance na střet částic, které se tedy přesouvají do „volnějších“ míst. Jakmile je koncentrace ve všech místech tekutiny stejná, molekulární difuze ustává a soustava je v rovnováze. Brownův pohyb ale přetrvává [12].

Přestup hmoty je měřen jako tok. Jde o množství látky, které projde jednotkovou plochou za jednotku času, a je úměrné gradientu koncentrace a konstantě úměrnosti. V případě transportu látky uvnitř jedné fáze je gradient koncentrace v podstatě celou hnací silou difuze. Zmíněná konstanta úměrnosti zohledňuje schopnost látky difundovat v určitém prostředí a závisí na obou substancích, mezi kterými k tomuto procesu dochází. Je také závislá na tlaku a teplotě, přičemž v případě kapaliny je závislost prvního jmenovaného parametru a koeficientu lineární [15]. Vztah přestupu hmoty je definován jako první Fickův zákon, v tomto případě jako molární tok.

$$J_x = \frac{\dot{N}_x}{A} = -D \frac{dC}{dz} \quad (2.7)$$

kde:

J_x	[mol · s ⁻¹ · m ⁻²]	difuzní tok látky x ,
\dot{N}_x	[mol · s ⁻¹]	molární tok látky x ,
A	[m ²]	mezifázová plocha,
D	[m ² · s ⁻¹]	difuzní koeficient,
C	[mol · m ⁻³]	molární hustota látky x ,
z	[m]	vzdálenost od fázového rozhraní.

U plyných látek se využívá parciálních tlaků, kde nahrazují molární hustotu. Fázové rozhraní je obvykle propustné oběma směry, přičemž směr toku se odvíjí od cíle vytvoření rovnováhy na obou stranách tohoto rozhraní. Zákon je možné vyjádřit i hmotnostními toky, kdy platí:

$$J_x = \frac{\dot{M}_x}{A} = -D \frac{d\rho}{dz} \quad (2.8)$$

V případě dvousložkových směsí musí za předpokladu konstantního tlaku platit následující:

$$\dot{N} = \dot{N}_x + \dot{N}_y = 0 \quad (2.9)$$

Jinými slovy, aby byl zachován stálý tlak v celém systému, musí být zachován i počet molekul, které právě tlak způsobují. Množství difundující látky x je tedy nahrazováno stejným množstvím látky y . V případě jednosměrné difuze a za předpokladu ideálního chování plynu lze Fickův zákon po integraci upravit do následující podoby:

$$\dot{N}_x = \frac{D \cdot A \cdot p}{z \cdot R \cdot T} \cdot \frac{p_{x_I} - p_{x_F}}{p_{y_m}} \quad (2.10)$$

kde:

p	[Pa]	celkový tlak,
R	[J · mol ⁻¹ · K ⁻¹]	univerzální plynová konstanta,
T	[K]	teplota,
p_I	[Pa]	iniciální parciální tlak,
p_F	[Pa]	finální parciální tlak,
p_m	[m]	střední logaritmický koncentrační spád.

Indexy x a y u parciálních tlaků značí příslušnost k patřičným složkám, které v pohybu částic figurují. Tyto tlaky jsou závislé v přímé úměrnosti na koncentracích složek. Klesá-li v izobarickém systému parciální tlak, koncentrace se snižuje a částice složky proudí přes fázové rozhraní. Střední logaritmický koncentrační spád je pak dán vztahem (2.11).

$$p_{y_m} = \frac{p_{y_F} - p_{y_I}}{\ln \left(\frac{p_{y_F}}{p_{y_I}} \right)} \quad (2.11)$$

Uvedené vztahy prvního Fickova zákona platí pro tzv. stacionární difuzi, tedy že koncentrace difundující látky je ve všech bodech stejná. Protože ale během difuze postupně dochází ke vyrovnávání rozdílu koncentrací látky v obou fázích, tedy ke snižování koncentračního spádu, znamená to, že tento proces je závislý i na čase. Z tohoto důvodu je zaveden druhý Fickův zákon, který tento parametr zohledňuje [16].

2.1.3 Difuzní koeficienty

Je třeba mít na paměti, že Fickův zákon pro difuzi v kapalině a plynu využívá principiálně stejných konceptů, nicméně hodnoty koeficientů v odlišných fázích jsou řádově jiné, typicky se pohybují v rozmezí:

- 10^{-10} až 10^{-9} m²/s pro kapaliny,
- 10^{-6} až 10^{-5} m²/s pro plyny [12].

K určení difuzních koeficientů lze využít vícero empirických vztahů, v případě plyné fáze např. Arnoldova či Slaterryho a Birda. Většina z nich nicméně dopouští chyb. Nejrobustnější

a nejspolehlivější metodou je brána metoda od Chapmana a Cowlingse. Zároveň je ale velmi zdoluhavá kvůli koliznímu integrálu, který obsahuje [17]:

$$D = \frac{0,001858 \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{\frac{1}{2}}}{p \cdot \sigma'^2 \cdot \Omega(1,1)^*} \quad (2.12)$$

kde:

D	[cm ² /s]	difuzní koeficient,
T	[K]	teplota,
M	[g/mol]	molární hmotnost,
p	[atm]	celkový tlak,
σ'	[Å]	kolizní průměr,
$\Omega(1,1)^*$	[-]	kolizní integrál.

Právě z důvodu náročnosti výpočtu se postupně od tohoto vztahu upustilo a dnešní době se využívá jiných. Jde kupříkladu o metodu Wilkeho a Changa, viz rovnice (2.13), která je brána jako obecně přijatý standard [18].

$$D = \frac{7,4 \cdot 10^{-12} \cdot (\phi_s M_s)^{\frac{1}{2}}}{\mu_s V_D^{0,6}} \quad (2.13)$$

kde:

D	[m ² /s]	difuzní koeficient,
ϕ_s	[-]	konstanta rozpouštědla,
M_s	[g/mol]	molární hmotnost,
μ_s	[cP]	dynamická viskozita rozpouštědla,
V_D	[cm ³ /mol]	molární objem při normální teplotě varu.

Způsob určení difuzního koeficientu pro kapaliny se odvíjí podle druhu částice, která difunduje. V případě amoniaku lze použít vztah Hayduk-Laudieho, který se využívá pro neelektrolity a malé molekuly [19].

$$D = \frac{13,26 \cdot 10^{-5}}{\mu_s^{1,4} V_D^{0,589}} \quad (2.14)$$

kde:

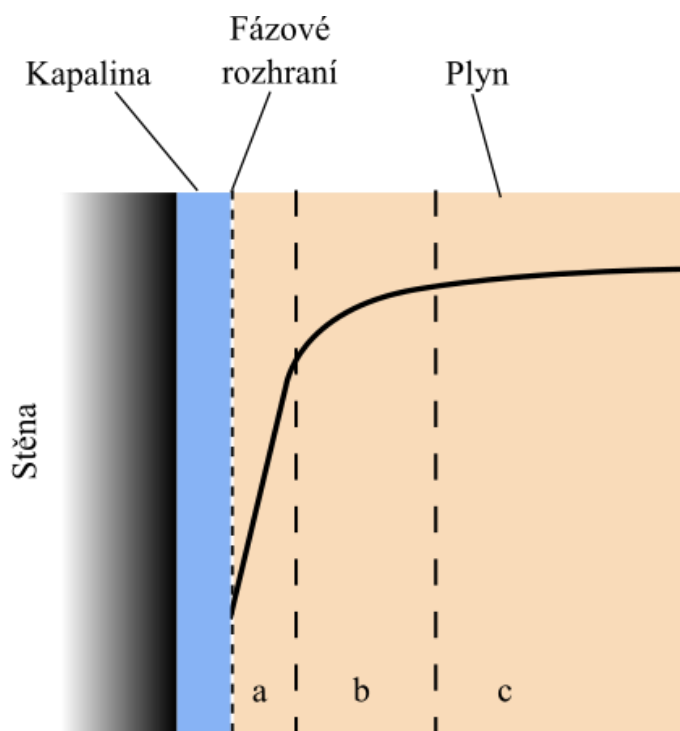
D	[m ² /s]	difuzní koeficient,
μ_s	[cP]	dynamická viskozita rozpouštědla,
V_D	[cm ³ /mol]	molární objem při normální teplotě varu.

2.1.4 Filmová teorie

Pro bližší popis procesu absorpce a desorpce je často používána tzv. filmová teorie. Při přenosu hmoty musí molekuly difundovat z objemu kapaliny do rozhraní kapalina-plyn, toto rozhraní překročit a následně odtud přejít do objemu plynu. V právě plynné části lze rozlišit 3 režimy toku, viz Obr. 2:

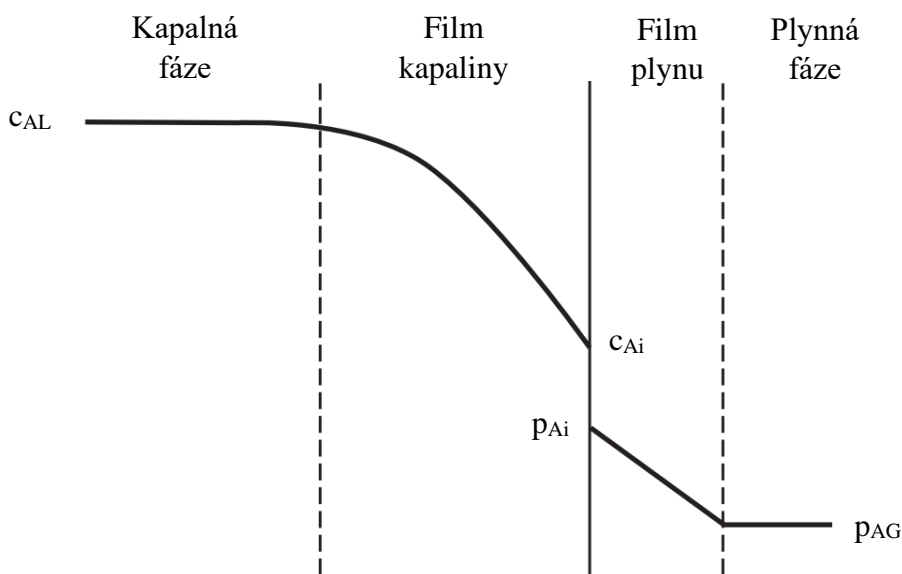
- laminární oblast,
- přechodová oblast,
- turbulentní oblast.

Níže uvedené schéma předpokládá, že fázové rozhraní je kontinuálně v rovnováze, odpor, který při procesu klade, je buď žádný nebo minimální. V laminární oblasti dochází k přestupu hmoty pouze vlivem molekulární difuze. Její tloušťka se odvíjí od stupně vířivosti dané fáze. V plně rozvinutém turbulentním regionu dochází k rychlejšímu přestupu vlivem vířivých toků [20].



Obr. 2 Průběh koncentrace v plynné fázi

Jelikož je výše uvedený jev příliš složitý na popis, je zavedeno zjednodušení. Čím blíže je složka fázovému rozhraní, tím vyšší je její koncentrace v kapalině. Poté dojde k překročení látky do plynu, kde se zvýší parciální tlak této složky. Podobný průběh samozřejmě platí i pro molární zlomky. Tento stav přitom platí v jakémkoliv bodě stripovacího zařízení. Na Obr. 3 je tento model znázorněn. Popisuje tedy průběh koncentrace c složky A v kapalině L a na fázovém rozhraní i , resp. průběh parciálního tlaku složky v plynu G .



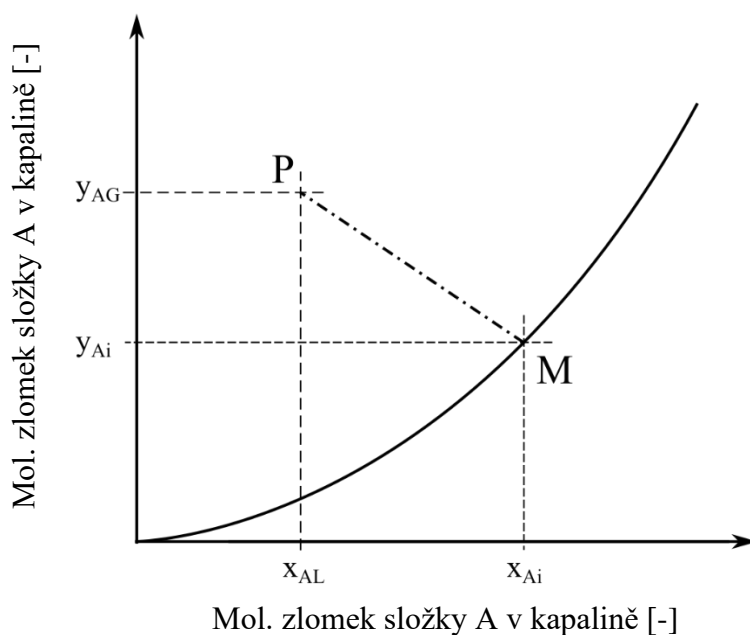
Obr. 3 Grafická interpretace filmového modelu [21]

Uvedená teorie platí s ohledem několika předpokladů:

- ustálený stav,
- fázové rozhraní má přesně vytyčené hranice,
- rovnováha ve fázovém rozhraní,
- bez chemické reakce.

Pro bližší popis tohoto modelu se využívá rovnovážné křivky. V podstatě se jedná o vykreslení závislosti koncentrací v plynu a kapalině na fázovém rozhraní, při předpokladu izobarického a izotermického stavu. Bod M reprezentuje koncentraci v plynu a kapalině na fázovém rozhraní při rovnováze, bod P pak představuje koncentrace v širším objemu fází. Tento bod se nachází mimo rovnovážnou křivku. Pokud by se nacházel na ní, nedocházelo by k difuzi složky A. Úsečka PM tedy představuje samotný přestup hmoty [11].

Diagram na Obr. 4 platí pro absorpci, nicméně princip při stripování je velmi podobný, pouze opačného smyslu. Z něj je zřejmé, že koncentrace složky A v plynu klesá z hodnoty y_{AG} na hodnotu y_{Ai} , přičemž právě tento rozdíl je hnací silou v plynné fázi. Analogický případ je i v kapalně fázi, kdy hnací silou je opět rozdíl koncentrací. Graf rovnovážné křivky je možno vyjádřit i pomocí vztahu parciálních tlaků a koncentrací (pro plyn, respektive kapalinu), základní myšlenka nicméně zůstává stále stejná.



Obr. 4 Rovnovážná křivka a zobrazení hnacích sil [11]

Tok složky A je možný popsat pomocí parciálních koeficientů přestupu hmoty. Záporný podíl těchto koeficientů je pak směrnici zmíněné úsečky PM.

$$N_A = k_G (y_{AG} - y_{Ai}) = k_L (x_{Ai} - x_{AL}) \quad (2.15)$$

kde:

N_A	$[\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}]$	molární tok látky A,
k_G	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	koeficient přestupu hmoty pro plynnou fázi,
y_{AG}	$[-]$	molární zlomek látky A v plynu,
y_{Ai}	$[-]$	molární zlomek látky A v plynu na fázovém rozhraní,

k_L	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	koeficient přestupu hmoty pro kapalnou fázi,
x_{Ai}	$[-]$	molární zlomek látky A v kapalině na fázovém rozhraní,
x_{AL}	$[-]$	molární zlomek látky A v kapalině.

Po úpravě pak:

$$\frac{y_{AG} - y_{Ai}}{x_{Ai} - x_{AL}} = -\frac{k_L}{k_G} \quad (2.16)$$

Převrácené hodnoty koeficientů představují odpor, který dané prostředí představuje pro přenos hmoty. Jsou-li tyto koeficienty známy, existují v podstatě dva způsoby, jak získat hodnoty látkového toku, potažmo tedy rychlost procesu. První možností je grafické řešení vykreslením úsečky PM, případně pak analytické řešení, které vychází z rovnice (2.16). Koeficienty se obvykle určují experimentální cestou [11].

Další cestou určení těchto koeficientů přestupu hmoty pro plynnou, resp. kapalnou fázi, jsou korelace. K těm patří např. Gnielinskiho, Gillilandova, Cornellova či Ondova metoda [12]. V návrhovém výpočtu bude použita právě poslední jmenovaná, původně zveřejněná v 60. letech 20. století [22]. Je postavena na velkém množství experimentálních dat a platí pro různé variace výplní kolony, u kterých se uplatňuje i mj. specifický smočený povrch náplně:

$$a_w = a \left\{ 1 - \exp \left[-1,45 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_L} \right) \cdot Re^{0,1} \cdot Fr^{-0,05} \cdot We^{0,2} \right] \right\} \quad (2.17)$$

kde:

a_w	$[\text{m}^2/\text{m}^3]$	smočený specifický povrch náplně,
a	$[\text{m}^2/\text{m}^3]$	vlastní specifický povrch náplně,
σ_c	$[\text{N}/\text{m}]$	kritické povrchové napětí náplně,
σ_L	$[\text{N}/\text{m}]$	povrchové napětí kapaliny,
Re	$[-]$	Reynoldsovo číslo,
Fr	$[-]$	Froudeho číslo,
We	$[-]$	Weberovo číslo.

Kritické povrchové napětí náplně, někdy také označováno jako povrchové napětí smáčivosti, se odvíjí od materiálu použitého pro výplň. Pohybuje se v desítkách mN/m. Přesné hodnoty pro jednotlivé možnosti jsou uvedeny v Tab. 4 [23], [24].

Tab. 4 Povrchová napětí smáčivosti

Materiál	σ_c [mN/m]
Porcelán	61
Ocel	75
Plast (PE)	33
Plast (PVC)	40
Uhlík	56
Sklo	73

Dále se ve vztahu vyskytují podobnostní čísla. Obecně jde o bezrozměrná čísla, která se používají v teorii podobnosti. Význam mají např. porovnávání dvou systémů z hlediska

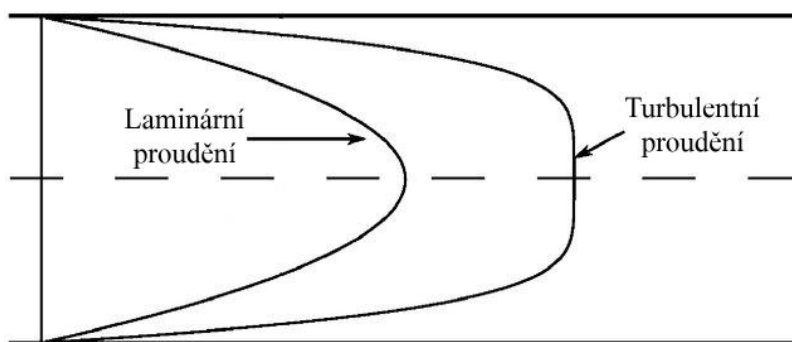
určitého pozorovaného jevu. Je-li vybraný jev obdobný v obou systémech, podobnostní čísla jsou stejná [25]. Může se tedy jednat o komparaci reálné situace s experimentálním modelem v malém měřítku.

Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo představuje vzájemný vztah setrvačných a třecích sil při proudění. Podle velikosti tohoto čísla se pak proudění rozlišuje na:

- laminární, $Re < 2300$ – třecí síly převažují nad setrvačnými,
- přechodové, $2300 < Re < 4000$,
- turbulentní, $Re > 4000$ – setrvačné síly převažují nad třecími [26].

Platí tedy, že čím vyšší Re je, tím větší podíl mají setrvačné síly na celkový odpor. Při laminárním proudění dochází k toku tekutiny ve vrstvách, které se vzájemně nemísí. Rychlostní profil v ustáleném stavu je parabolický. Turbulentní proudění je více chaotické a nepředvídatelné, ve velké míře se zde vyskytují víry. Jeho rychlostní profil je oproti laminárnímu plošší, v extrémním teoretickém případě, kdy se Re blíží k nekonečnu, se bude jednat o obdélník, tzv. pístový tok/profil [27].



Obr. 5 Rychlostní profily proudění [28]

Samotné Reynoldsovo číslo je závislé na několika veličinách:

$$Re = \frac{cd_h\rho}{\mu} \quad (2.18)$$

kde:

c	[m/s]	střední rychlost tekutiny,
d_h	[m]	hydraulický průměr,
ρ	[kg/m ³]	hustota tekutiny,
μ	[Pa·s]	dynamická viskozita tekutiny.

Výše uvedený vztah typicky platí pro proudění v uzavřeném potrubí či otevřených korytech. Při výpočtu specifického smočeného povrchu náplně se využívá lehce modifikované definice:

$$Re = \frac{L}{a\mu_L} \quad (2.19)$$

kde:

L	[kg/m ² s]	průtok tekutiny (kapaliny),
a	[m ² /m ³]	vlastní specifický povrch náplně,
μ_L	[Pa·s]	dynamická viskozita tekutiny (kapaliny).

Froudeho číslo

Toto podobnostní číslo vyjadřuje vliv gravitace na pohyb tekutiny, přesněji jde o poměr setrvačných a gravitačních sil. Je-li jeho hodnota Fr nižší než 1, jde o subkritický tok, ve kterém převažuje gravitace. V případě, kdy $Fr > 1$, se jedná o nadkritický tok, v němž převládá setrvačnost. Často je využíváno při projektování koryt vodních toků [29]. Obecně je určeno následovně:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gD_H}} \quad (2.20)$$

kde:

v	[m/s]	rychlost proudění,
g	[m/s ²]	gravitační zrychlení,
D_H	[m]	hydraulická hloubka.

V případě stanovení a_w je vztah opět upraven:

$$Fr = \frac{L^2 a}{\rho_L^2 g} \quad (2.21)$$

kde:

L	[kg/m ² s]	průtok tekutiny (kapaliny),
a	[m ² /m ³]	vlastní specifický povrch náplně,
ρ_L	[kg/m ³]	hustota kapaliny,
g	[m/s ²]	gravitační zrychlení.

Weberovo číslo

Posledním podobnostním číslem, které se vyskytuje ve vztahu (2.17), je Weberovo. Udává poměr mezi setrvačnými silami a silami vzniklé povrchovým napětím [30]. Svě uplatnění nalézá kupříkladu u popisu formování kapek a bublin. Čím vyšších hodnot nabývá, tím nižší je efekt povrchového napětí.

$$We = \frac{lv^2 \rho}{\sigma} \quad (2.22)$$

kde:

l	[m]	charakteristická délka,
v	[m/s]	rychlost proudění,
ρ	[kg/m ³]	hustota tekutiny,
σ	[N/m]	povrchové napětí tekutiny.

I tento parametr je určen mírně odlišným způsobem:

$$We = \frac{L^2}{\rho_L \sigma a} \quad (2.23)$$

kde:

L	[kg/m ² s]	průtok kapaliny,
ρ_L	[kg/m ³]	hustota kapaliny,
σ	[N/m]	povrchové napětí kapaliny,
a	[m ² /m ³]	vlastní specifický povrch náplně.

Všechny tyto veličiny pak figurují v parametru smočeného specifického povrchu náplně a zároveň i ve výpočtu koeficientu přestupu hmoty na straně kapalně fáze:

$$k_L \left(\frac{\rho_L}{\mu_L g} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,0051 \left(\frac{L}{a_w \mu_L} \right)^{\frac{2}{3}} (ad_p)^{0,4} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_L} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.24)$$

kde:

k_L	[m/s]	koeficient přestupu hmoty pro kapalnou fázi,
ρ_L	[kg/m ³]	hustota kapaliny,
μ_L	[Pa·s]	dynamická viskozita kapaliny,
g	[m/s ²]	gravitační zrychlení,
L	[kg/m ² s]	průtok kapaliny,
a_w	[m ² /m ³]	smočený specifický povrch náplně,
D_L	[m ² /s]	difuzní koeficient kapalné fáze.

Uvedený difuzní koeficient, jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, může být stanoven pomocí tabelovaných hodnot, nebo empirických vztahů, jako je kupříkladu Hayduk-Laudieho, viz rovnice (2.14). V případě koeficientu přestupu hmoty již není zastoupen smočený specifický povrch náplně, nýbrž pouze vlastní specifický povrch náplně [12]:

$$k_G = 5,23 (aD_G) \left(\frac{G}{a\mu_G} \right)^{0,7} \left(\frac{\mu_G}{\rho_G} \right)^{\frac{1}{3}} (ad_p)^{-2} \quad (2.25)$$

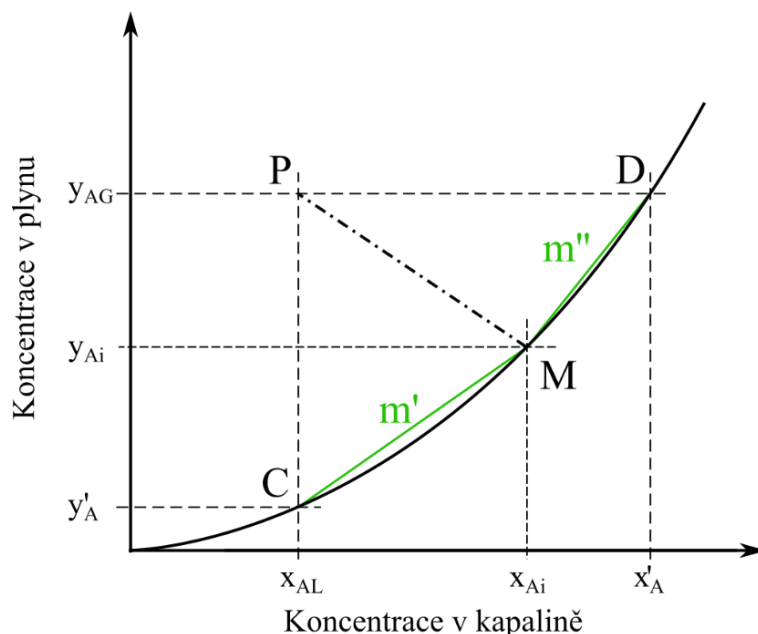
kde:

k_G	[m/s]	koeficient přestupu hmoty pro plynnou fázi,
a	[m ² /m ³]	vlastní specifický povrch náplně,
D_G	[m ² /s]	difuzní koeficient plynné fáze,
G	[kg/m ² s]	průtok plynu,
μ_G	[Pa·s]	dynamická viskozita plynu,
ρ_G	[kg/m ³]	hustota plynu,
d_p	[m]	velikost výplně.

Některé zdroje, jako je např. [23], uvádí, že konstanta 5,23 se odvíjí od velikosti náplně, přičemž je-li menší než 15 mm, měla by být nahrazena hodnotou 2,00. Větší část dostupné literatury nicméně kalkuluje s případem uvedeným v rovnici (2.25).

2.1.5 Koeficient prostupu hmoty

V předchozí kapitole byl představen postup určení látkového toku pomocí dílčích koeficientů přestupu hmoty k_L a k_G . Je-li však tento postup nevhodný, zavádí se celkové koeficienty prostupu hmoty, při kterých se využívá koncentrací x'_A a y'_A , viz Obr. 6. Velmi náročný je totiž proces určování koncentrací na fázovém rozhraní, jelikož experimentálními cestami je obtížné získání potřebných vzorků právě z této miniaturní oblasti.



Obr. 6 Rovnovážná křivka s celkovými rozdíly koncentrací [11]

Jde o koncentrace v plynné a kapalně fázi, které jsou v rovnováze s x_{AL} , resp. y_{AG} . Právě pomocí celkových koeficientů a těchto koncentrací je pak možné určit látkový tok. Výsledný tvar vztahu je pak velmi podobný rovnici (2.15):

$$N_A = K_G (y_{AG} - y'_A) \quad (2.26)$$

Respektive pro kapalnou fázi:

$$N_A = K_L (x'_A - x_{AL}) \quad (2.27)$$

V případě, kdy je rovnovážná křivka přímkou, je možno vzájemný vztah koncentrací ve fázích popsat jako:

$$y_A = mx_A \quad (2.28)$$

Po následných úpravách vztahů (2.15), (2.26) a (2.27) spolu s uvedeným (2.28), lze dospět k závislosti celkových a dílčích koeficientů:

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{mk_G} + \frac{1}{k_L} \quad (2.29)$$

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{m}{k_L} \quad (2.30)$$

Není-li naplněn předpoklad a zjednodušení, že rovnovážná křivka je přímkou, závislost je lehce modifikována, viz následující vztahy a Obr. 6.

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{m''k_G} + \frac{1}{k_L} \quad (2.31)$$

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{m'}{k_L} \quad (2.32)$$

Pokud je hodnota směrnice m' nízká, znamená to, že rovnovážná křivka je velmi plochá. V takovém případě je poslední člen ve rovnici (2.32) zanedbatelný a může platit, že převrácené hodnoty celkového a dílčího koeficientu jsou stejné. Převrácená hodnota dílčího koeficientu zároveň představuje míru odporu přestupu hmoty v plynné fázi. Z toho lze vyvodit dva závěry: (znečišťující) látka je dobře rozpustná v kapalině a přestup hmoty je v režii plynu.

Analogický myšlenkový pochod lze aplikovat i pro kapalnou fázi – je-li hodnota m vysoká, pak bude rovnovážná křivka strmá a převrácené hodnoty koeficientů s indexem x budou na podobné úrovni. Přestup hmoty bude řízen kapalinou. Detailněji je tato problematika popsána např. v [11].

K popisu rovnovážné křivky je možno využít Henryho konstantu, a to typicky v případech, že koncentrace kontaminantu v kapalině nejsou vysoké, viz kapitola 2.1.1. Vztah (2.29) tedy pak lze upravit do následující podoby:

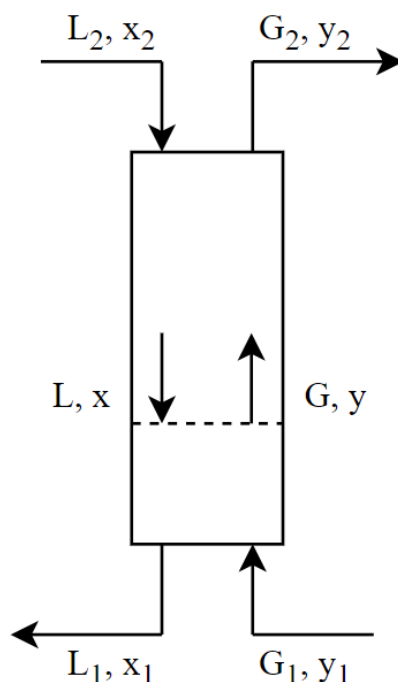
$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{k_G H} \quad (2.33)$$

Při návrhových výpočtech se uvádí rychlost přenosu hmoty objemově. Tím se docílí rozšířením předchozí rovnice o specifický povrch náplně kolony. Platí tedy [13]:

$$\frac{1}{K_L a} = \frac{1}{k_L a} + \frac{1}{k_G a H} \quad (2.34)$$

2.1.6 Bilance kolony

V následující kapitole bude popsána bilance procesu stripování. Na Obr. 7 je zjednodušené schéma stripovací kolony, kde jsou znázorněny vstupující a vystupující toky médií. Kontaminovaná kapalina proudí z vrchní části do paty kolony, zatímco čistící plyn ze spodní části do hlavy kolony.



Obr. 7 Bilance stripovací kolony

Ve směru odshora dolů se tedy koncentrace znečišťující látky v kapalině postupně snižuje, zatímco v opačném směru se koncentrace v plynu kontinuálně zvyšuje. Obecně je ale dáno, že počet molů vstupujících do zařízení je stejný, jako počet molů z něj vystupujících, tedy:

$$L_1 x_1 + G_2 y_2 = G_1 y_1 + L_2 x_2 \quad (2.35)$$

Proudy kapaliny a plynu jsou znázorněny jako L a G , x a y pak reprezentují molové koncentrace. Závislost lze popsat i pomocí relativních zlomků. Proudy obou fází jsou pak vyjádřeny v čisté

formě, tedy bez kontaminantu, a uvedeny s indexem S . Zároveň platí, že molové koncentrace, resp. relativní zlomky, lze nahradit hmotnostními koncentracemi [11].

$$L_S X_1 + G_S Y_2 = G_S Y_1 + L_S X_2 \quad (2.36)$$

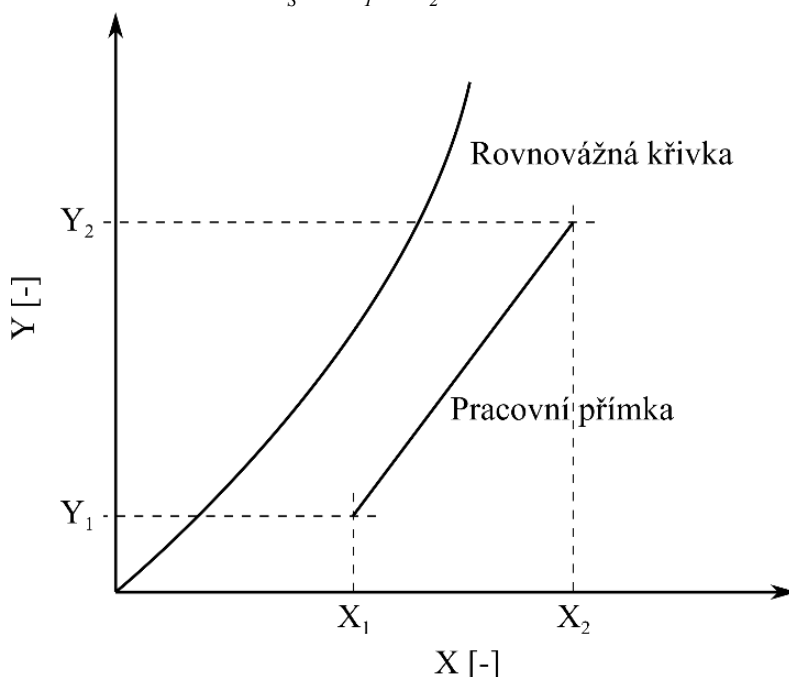
Samotné relativní zlomky jsou pak definovány následovně:

$$X = \frac{x}{1-x} \quad (2.37)$$

$$Y = \frac{y}{1-y} \quad (2.38)$$

Po vytknutí a úpravě vztahu (2.36) lze získat směrnici pracovní přímky, která představuje v podstatě grafické zobrazení materiálové bilance.

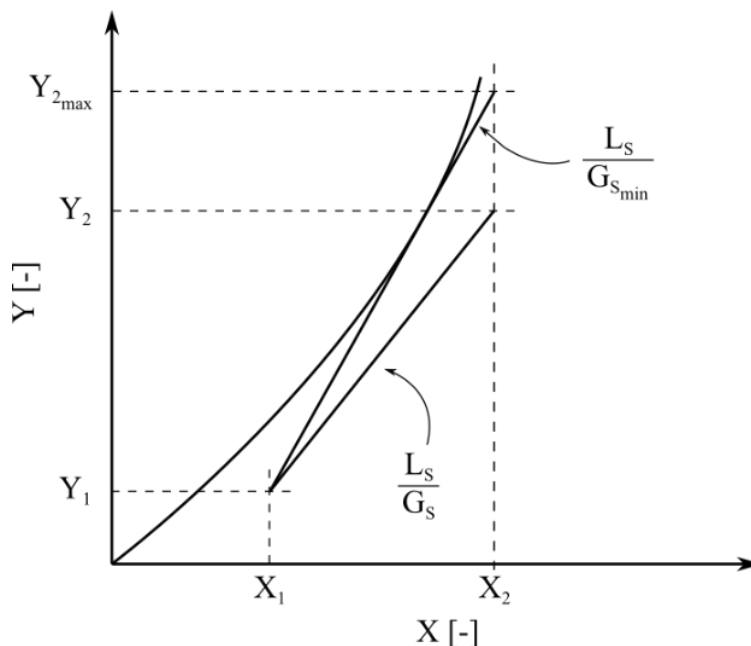
$$\frac{L_S}{G_S} = \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} \quad (2.39)$$



Obr. 8 Vzájemná poloha rovnovážné křivky a pracovní přímky při stripování

Výše uvedený tvar rovnice (2.39) na předchozí stránce platí pro relativní zlomky vztahující se pro hlavu a patu kolony. Lze jej ale nicméně i transformovat do podoby využívající stav v libovolném bodě stripovacího zařízení. Na Obr. 8 je pak znázorněn vzájemný vztah rovnovážné křivky a pracovní přímky, která je pod zmíněnou křivkou.

Při navrhování kolony je většinou známo množství kapaliny určené k čištění, přičemž množství plynu je subjektem ke stanovení. Toto množství, resp. poměr obou fází, může být dvojího typu – minimální a „skutečné“. Rozdíl mezi nimi je vykreslen na obrázku níže. Minimální poměr značí, že pracovní přímka je v podstatě tečnou k rovnovážné křivce. V tomto případě se ale počet rovnovážných stupňů blíží k nekonečnu, jde tedy pouze o teoretickou hodnotu. Jde o krajní případ, pokud by pracovní přímka překročila rovnovážnou křivku, nedocházelo by k přenosu látky z kapaliny do plynu. Při změně sklonu přímky je bod $[X_1; Y_1]$ pevně fixován, mění se pouze ypsilonová souřadnice v hlavě kolony, viz Obr. 9.



Obr. 9 Porovnání pracovních přímek stripovací kolony

2.1.7 Stripovací faktor

V případě, kdy rovnovážnou křivku lze popsat jako přímku, je využit Henryho zákon. Henryho konstanta se pak vyskytuje u parametru často využívaným k vyhodnocení vzájemné polohy rovnovážné a pracovní přímky. Jde o stripovací faktor, poměr sklonů obou linek.

$$S = \frac{H}{\frac{L_s}{G_s}} \quad (2.40)$$

Obvykle se pak používá upravený tvar rovnice [13]:

$$S = \frac{G_s}{L_s} H \quad (2.41)$$

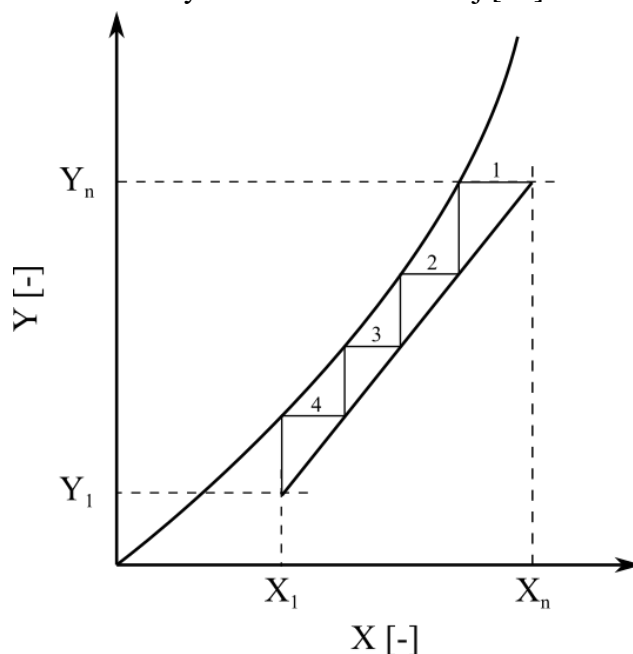
Je-li hodnota tohoto faktoru rovna 1, pak jsou obě přímky paralelní. Pokud je nižší než 1, sklon pracovní přímky je větší než rovnovážné. V optimálním případě je stripovací faktor vyšší než 1, pak je sklon pracovní přímky menší než rovnovážné [12].

2.1.8 Koncept NTU a HTU

Pravděpodobně nejcharakterističtějším parametrem stripovací kolony je její výška. Ta se odvíjí od počtu rovnovážných stupňů – platí přímá úměra. Stanovení hodnoty tohoto parametru záleží na druhu kolony. Jde-li o patrovou kolonu, určuje se počet pater, např. grafickou metodou McCabe-Thiele. V případě výplňové kolony to je výška výplně. Zde se využívá převodových jednotek.

Metoda určení počtu rovnovážných stupňů McCabe-Thiele byla původně představena ve 20. letech 20. století. Jeho zjednodušené schéma je na obrázku níže, inspirováno ze zdroje [12]. Proces začíná v hlavě kolony, kdy je z bodu $[X_n; Y_n]$ vedena přímka rovnoběžná s osou x . V místě, kde se tato přímka setká s rovnovážnou křivkou je bod, který představuje rovnováhu mezi kapalnou a plynnou fází. Z tohoto bodu je sestrojena přímka rovnoběžná s osou y , která se dotýká pracovní přímky. Tento postup se opakuje až do chvíle, kdy je dosaženo koncentrace

na výstupu kapaliny. Vytváří se tedy schodovitá struktura, kde každý schod představuje rovnovážný stav. Samotná výška kolony je pak stanovena jako součin sumy rovnovážných stupňů a vzdáleností mezi dvěma patry. Tato vzdálenost je ovlivněna více faktory, ať už mechanickými nebo ekonomickými. Obvykle se pohybuje v intervalu 45-60 cm, v závislosti na průměru kolony, nicméně může nabývat hodnot i mimo něj [31].



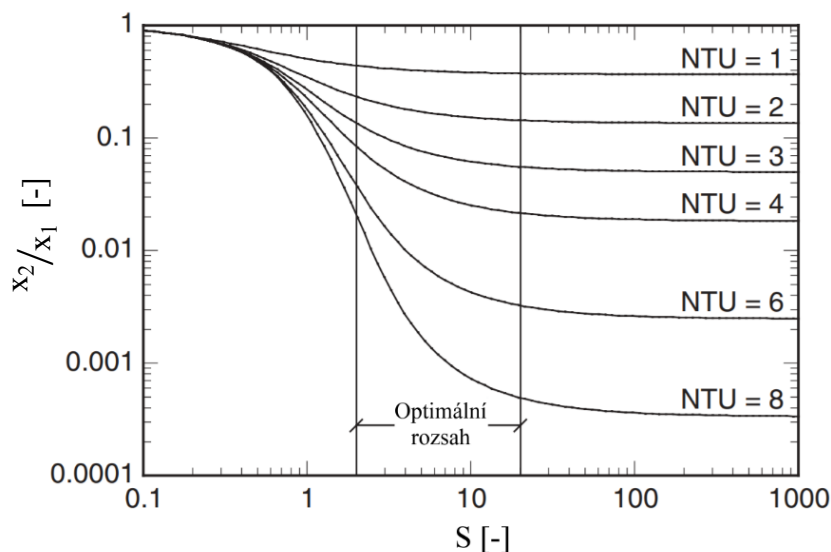
Obr. 10 Rovnovážné stupně procesu

V případě náplňových kolon lze využít konceptu NTU a HTU, Number of Transfer Units a Height of Transfer Units. V češtině by se dal použít výraz počet a výška přenosových jednotek. Výška náplně je stanovena jako součin těchto dvou parametrů.

NTU představuje míru náročnosti procesu. Čím složitější je, tím vyšších hodnot bude nabývat. Jde o bezrozměrnou veličinu, která zaujímá podobnou funkci jako počet teoretických pater u patrové kolony. Za předpokladu, že rovnovážná a pracovní křivky jsou přímky, je definována jako:

$$NTU = \frac{S}{S-1} \ln \left(\frac{1 + \frac{x_2}{x_1}(S-1)}{S} \right) \quad (2.42)$$

Z této rovnice je zjevné, že NTU je závislé kromě počáteční a koncové koncentraci v kapalině také na stripovacím faktoru. Jejich vzájemný vztah je zobrazen na Obr. 11. Z něj plyne, že při zvýšení stripovacího faktoru dojde ke snížení NTU. Optimální rozsah se pak pohybuje mezi 2 až 20.



Obr. 11 Závislost NTU na relativní koncentraci a stripovacím faktoru [12]

Parametr HTU reprezentuje efektivitu vybrané náplně. Zohledňuje koeficient prostupu hmoty, čím vyšší je, tím účinněji proces probíhá a tím nižší hodnota HTU je [32]:

$$HTU = \frac{L}{AK_L a} \quad (2.43)$$

kde:

L	$[m^3/s]$	vstupní průtok vody,
A	$[m^2]$	plocha průřezu kolony,
$K_L a$	$[s^{-1}]$	koeficient prostupu hmoty (viz rovnice (2.34)).

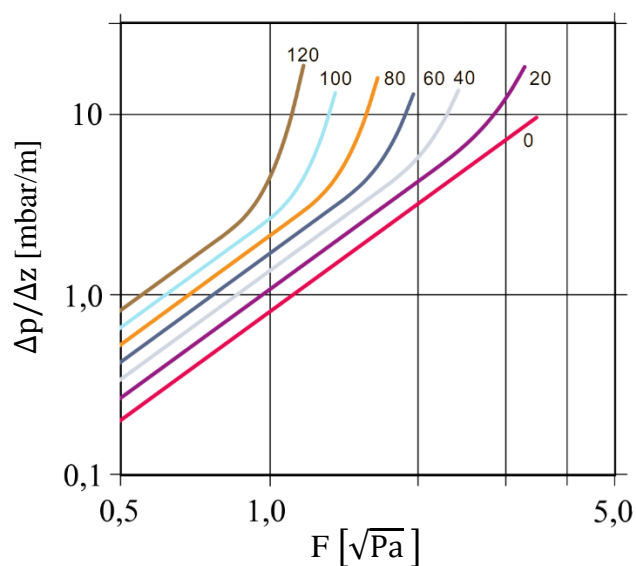
Výška přenosové jednotky je tedy mimo jiné závislá na ploše průřezu, tudíž i na průměru kolony.

2.1.9 Průměr kolony

Při určování tohoto parametru je zapotřebí znát limitní rychlost proudění plynu. Je to z toho důvodu, že vyšší rychlost způsobuje vyšší odpor proudění vody a tlakovou ztrátu. Při překročení limitní rychlosti pak dochází k zahlcení kolony. Průměr je volen tak, aby se provozní zaplnění kolony pohybovalo v rozmezí 65-90 %, nebo aby byla splněna daná tlaková ztráta na určitou výšku výplně [24]. Existují v podstatě 3 možnosti určení ztráty tlaku:

- sběr dat při samotném provozu,
- tabelované hodnoty výrobce náplně,
- využití zobecněné Eckertovy křivky.

Nejspolehlivější metodou je první možnost. Zároveň je ale i nejnákladnější a časově nejnáročnější. Tabelované, resp. grafické znázornění tlakových ztrát od jednotlivých výrobců může být výhodné, je-li předem dáno, jaká výplň či výplně budou použity. Příklad těchto dat je zobrazen na následujícím obrázku Obr. 12, který pochází od švýcarské společnosti Sulzer. Na ose x je faktor F spojený s průtokem plynu, na ose y pak tlaková ztráta na metr výplně. Jednotlivé barevně odlišené křivky reprezentují různé průtoky kapaliny (v jednotkách m^3/m^2h).



Obr. 12 Křivky tlakových ztrát [33]

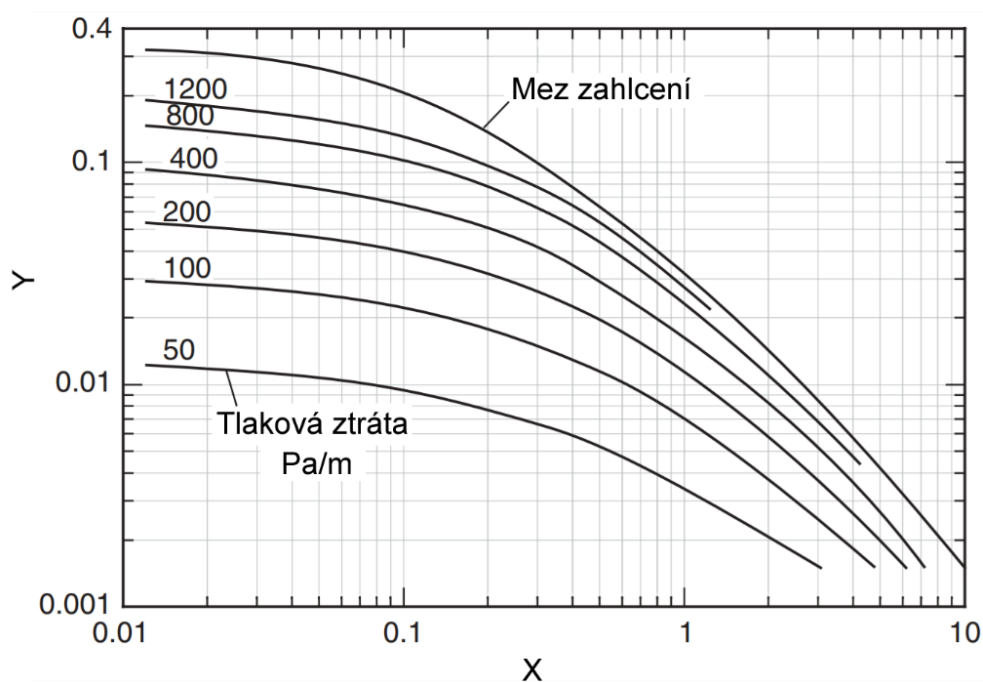
Zmíněný F faktor je definován jako:

$$F = v_G \rho_G^{0,5} \quad (2.44)$$

kde:

v_G [m/s] rychlost průtoku plynu,
 ρ_G [kg/m³] hustota plynu.

Pokud první dvě možnosti určení tlakové ztráty nejsou vhodné, například z důvodu nedostupnosti dat pro požadovanou výplň od výrobce, přichází na řadu Eckertova korelace. Ta dává do souvislosti tlakovou ztrátu, kapacitu a průtok [12]. Protože tato korelace pochází ze 60. let 20. století, je nejvhodnější pro výplně prvních generací, jako je rashig nebo pall kroužky, či intalox sedla.



Obr. 13 Eckertova korelace tlakové ztráty [12]

Hodnoty na osách jsou stanoveny následujícím způsobem:

$$X = \frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0,5} \quad (2.45)$$

kde:

L'	[kg/s]	průtok kapaliny,
G'	[kg/s]	průtok plynu,
ρ_L	[kg/m ³]	hustota kapaliny,
ρ_G	[kg/m ³]	hustota plynu.

$$Y = F_p C_s^2 \mu_L^{0,1} \quad (2.46)$$

kde:

F_p	[ft ² /ft ³]	faktor náplně,
C_s	[m/s]	kapacitní parametr,
μ_L	[Pa·s]	dynamická viskozita kapaliny.

Faktor náplně je záměrně zachován v angloamerické měrné soustavě. Je to z důvodu předcházení možných omylů, které by mohly nastat při převodu, jelikož většina odborné literatury a výrobců uvádí tento parametr právě v uvedených jednotkách. Některé zdroje nicméně uvádí i upravené vztahy, kde je F_p uváděn v jednotkách soustavy SI, tedy jako m²/m³, resp. m⁻¹ [12].

Při navrhování průměru kolony podle tlakové ztráty by tento parametr měl nabývat hodnot v intervalu 200-400 Pa/m [11]. Zároveň by průměr neměl být menší než desetinásobek velikosti náplně [12]. Je to z toho důvodu, aby bylo zamezeno stěnovému efektu, kdy velké množství kapaliny stéká právě po stěně kolony, nikoliv skrz náplň. Tím dochází ke snižování účinnosti procesu.

2.1.10 Faktory ovlivňující stripování amoniaku

Stripování amoniaku může být ulehčeno při navození příznivých podmínek. Takových faktorů je více, ovšem největší vliv mají pH a teplota.

pH

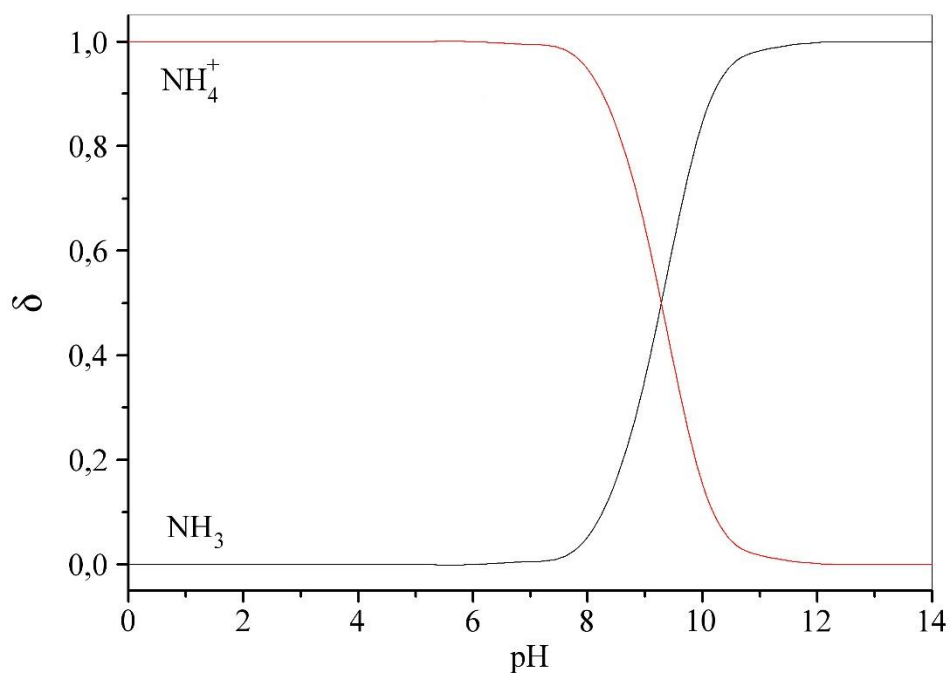
Ve vodě dochází k rozpouštění amoniaku ve vodě, přičemž vznikají amonné soli. Podíl tohoto rozpouštění závisí především na pH vodního roztoku. Zároveň platí, že při procesu stripování je možné odstranit pouze nedisociovanou formu. Hodnota pH tedy rozhoduje o účinnosti celého procesu.



Závislost poměrů obou forem je zobrazena na obrázku Obr. 14. Množství každé z nich ku celkovému množství molekul je popsáno pomocí distribučního koeficientu δ , pro plynnou formu dán jako [10]:

$$\delta = \frac{c(NH_3)}{c(NH_3) + c(NH_4^+)} \quad (2.47)$$

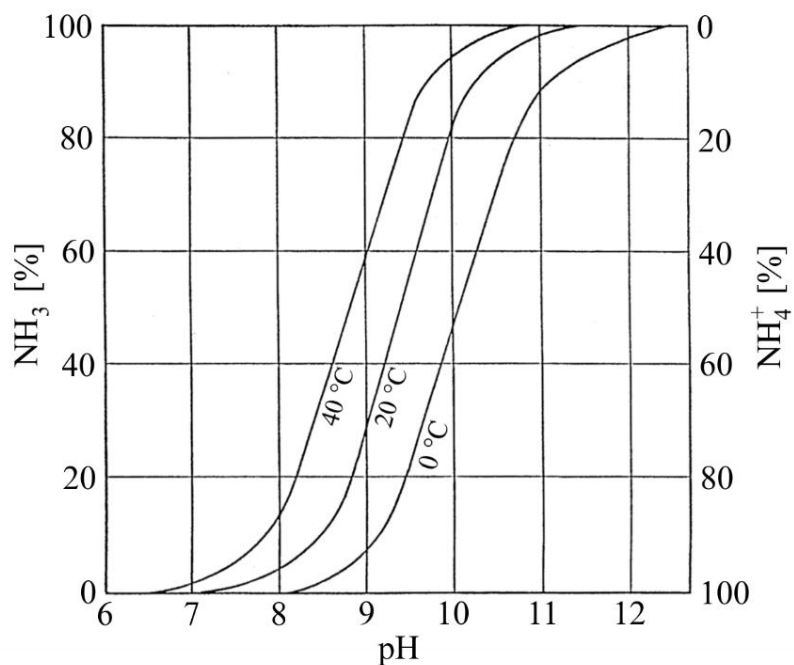
Z grafu je zřejmé, že jejich rovnováha nastává přibližně při hodnotě pH 9,25. Ta ovšem závisí i na teplotě. V tomto případě jde přibližně o 25 °C. Při dalším růstu se pak podíl nedisociované plynné formy stále zvyšuje. Při pH 11 je distribuční koeficient prakticky roven 1, a tudíž je téměř všechen amoniak přítomen v nedisociované formě.



Obr. 14 Zastoupení disociované a nedisociované formy v závislosti na pH, upraveno dle [34]

Teplota

Jak již bylo zmíněno, rozpustnost amoniaku se odvíjí i od teploty. Při daném pH se při zvyšující se teplotě roste i zastoupení NH_3 . Tato závislost je zobrazena na následujícím obrázku. Rozpustnost je tedy za nižších teplot vyšší.



Obr. 15 Rozpustnost amoniaku v závislosti na teplotě [13]

2.2 Typy kolon

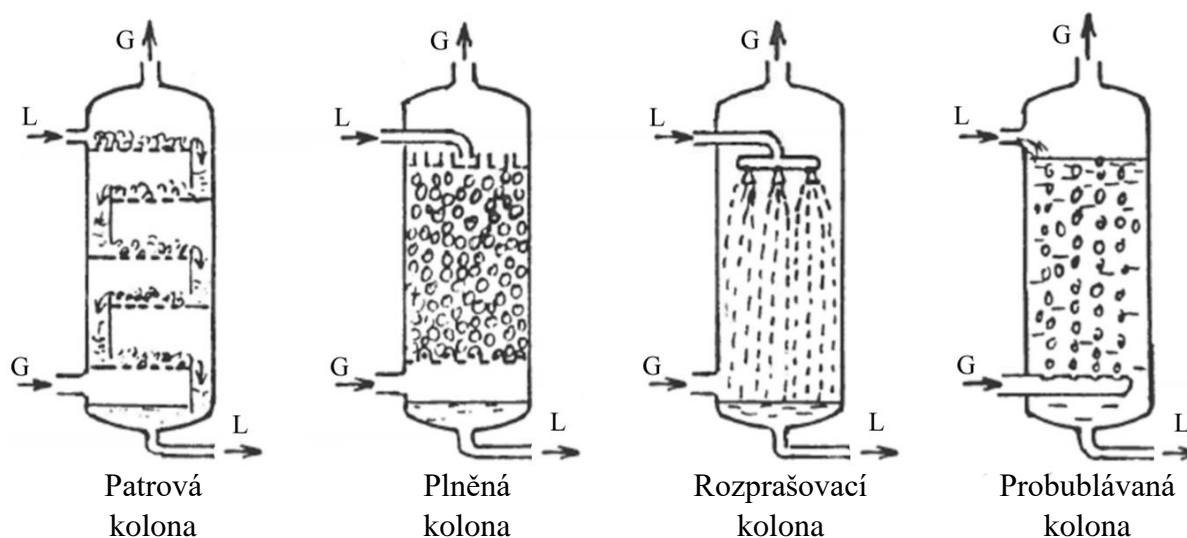
Věž či kolona je zařízení obvykle válcovitého tvaru, které pracuje ve vertikální poloze. Lze ji rozdělit na v podstatě 3 díly – víko, plášť a dno. Krajní části jsou obvykle realizovány pomocí jednoho ze tří tvarů:

- torosferický, který je nejčastější,
- eliptický,
- kulový [35].

Kolony lze rozlišovat pomocí dvou kritérií – na základě způsobu montáže, nebo podle vnitřního vybavení. V prvním případě se nabízí 2 možnosti. Tou první je přírubová kolona, u které jsou její jednotlivé segmenty spojeny přírubami. Jsou tedy vhodné např. v případě využívání různých vnitřních konfigurací. Obvykle se používají při menších rozměrech, kdy průměr dosahuje 50-800 mm. Druhou alternativou jsou svařované kolony. Ty se používají u větších rozměrů, horní limit průměru je pak přibližně 16 m [36]. Nedílnou součástí tohoto typu kolon jsou průřezy a pracovní otvory, které slouží k montáži, čištění, bezpečnostním podmínkám apod.

Z hlediska vnitřního uspořádání lze věže rozdělit do více kategorií:

- rozprašovací (sprchové),
- probublávané,
- patrové,
- plněné.

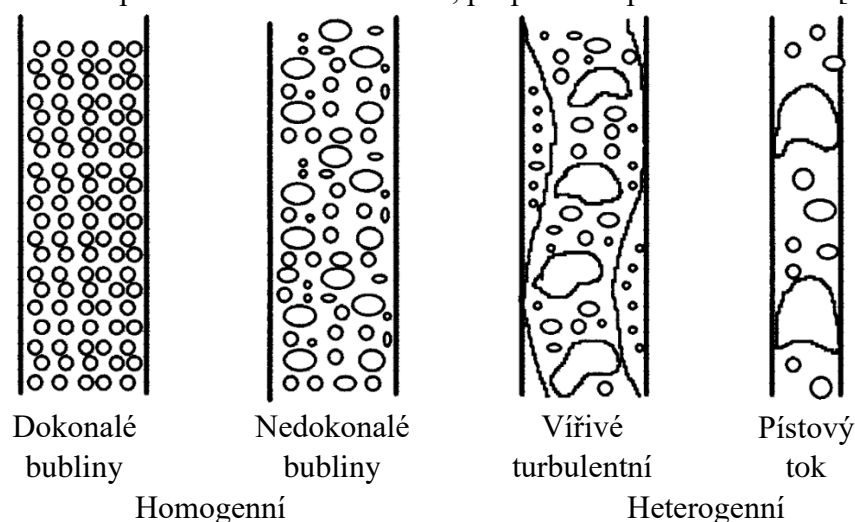


Obr. 16 Typy kolon [37]

V rozprašovacích kolonách dochází k vytváření drobných kapek kapaliny před stykem s plynem. K tomu slouží uzpůsobená zařízení jako jsou sprchy, dýzy, nebo rozprašovací trysky. Kolona jako taková je prázdná, styčnou plochou je tedy povrch právě vzniklých kapek. Jsou tedy konstrukčně jednoduché, na druhou stranu trpí nízkou účinností. Obecně tento typ není nijak široce využíván v praxi [21].

Druhou skupinou jsou probublávané kolony. Obdobně jako v předchozím případě, i tento typ není příliš náročný na konstrukci, navíc jsou schopné manipulovat s velkým množstvím pracovní látky. Funguje na tom principu, že věž je naplněna sloupcem kapaliny, kterou je

probubláván plyn. Mezifázové rozhraní je opět malé, intenzita přestupu hmoty je tedy také nízká. V závislosti na způsobu formování bublin se režimy proudění dělí na homogenní a heterogenní, viz obrázek Obr. 17. Homogenní režim nastává při nízkých rychlostech toku plynu, obvykle do 5 cm/s. Při vyšších rychlostech nastává vířivé turbulentní proudění, přičemž velikost bublin se může pohybovat v řádech milimetrů až centimetrů. Dochází k němu u kolon větších rozměrů, které se používají v průmyslu [38]. Posledním typem proudění je tzv. slug flow, někdy také označován jako pístový tok. Jde o případ, kdy bubliny mohou dosahovat takových rozměrů, že zaplní celý průřez kolony. Zatím byl tento jev pozorován pouze na laboratorní úrovni v experimentálních zařízeních, při průměru pláště do 15 cm [39].

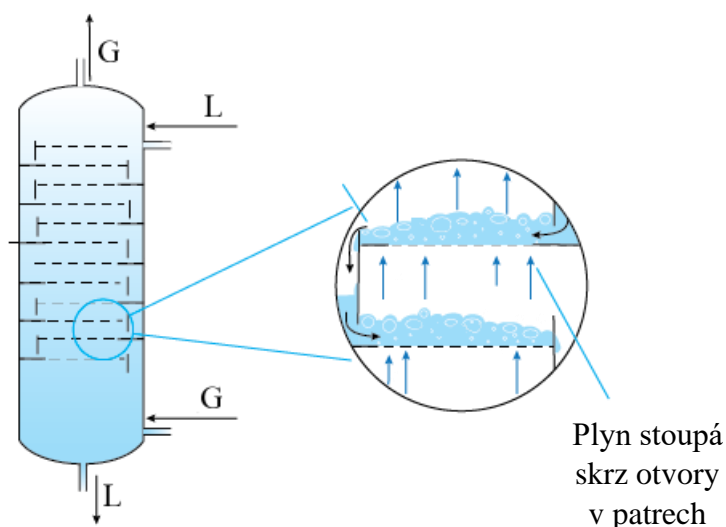


Obr. 17 Režimy proudění v probublávané koloně [40]

Poslední dvě uvedené kategorie věží patří k nejpoužívanějším. Budou blíže popsány v jednotlivých samostatných kapitolách, společně s jejich vnitřním vybavením.

2.2.1 Patrové kolony

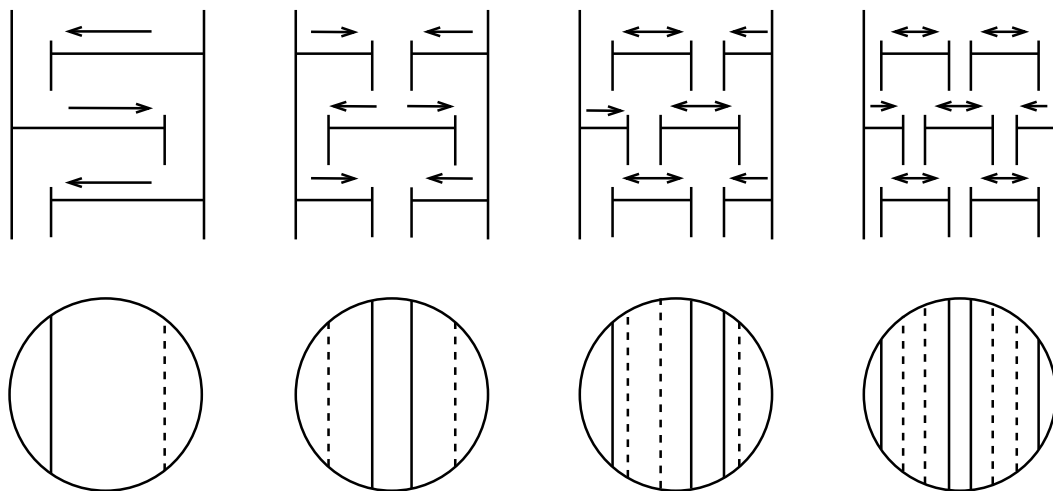
Jak již název napovídá, charakteristickým znakem těchto věží jsou patra, která slouží ke zprostředkování styku kapaliny a plynu. Využívají se k velkým průtokům a při větších rozměrech. Oproti výplňovým kolonám mají výhodu v podobě nižších nákladů a menší tlakové ztráty.



Obr. 18 Obecné schéma patrové kolony (upraveno dle [41])

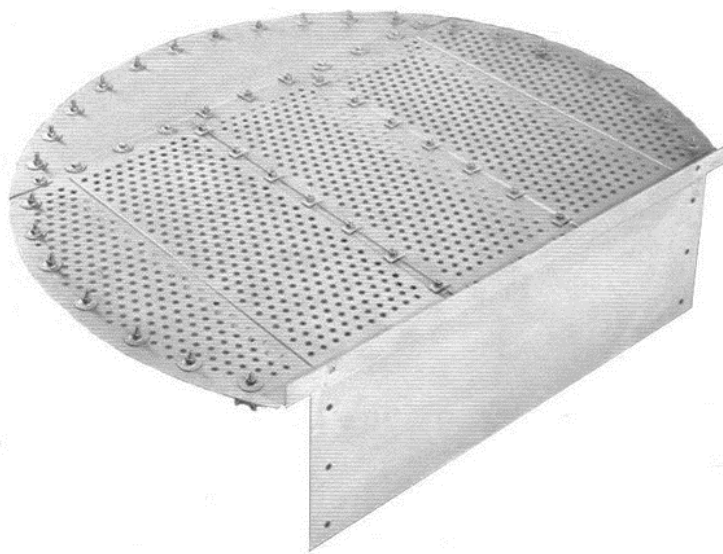
Na obrázku Obr. 18 je zobrazeno zjednodušené schéma patrové kolony. Jde o nejjednodušší typ, tzv. s jedním přepadem. Těchto přepadů ale může být více, za účelem snížení množství kapaliny na patře. U kolon s více přepady ale hrozí riziko nerovnoměrné distribuce látky, což má za následek snížení efektivity. Obecným postupem při návrhu je minimalizace počtu přepadů [42].

Vzdálenost mezi jednotlivými patry je volena dle toho, aby byla zajištěna snadná údržba. Větší vzdálenost nicméně ale znamená i ovlivnění celkové výšky kolony, což je nežádoucí a zbytečné [43]. Cílem je tedy mít tento parametr co nejmenší.



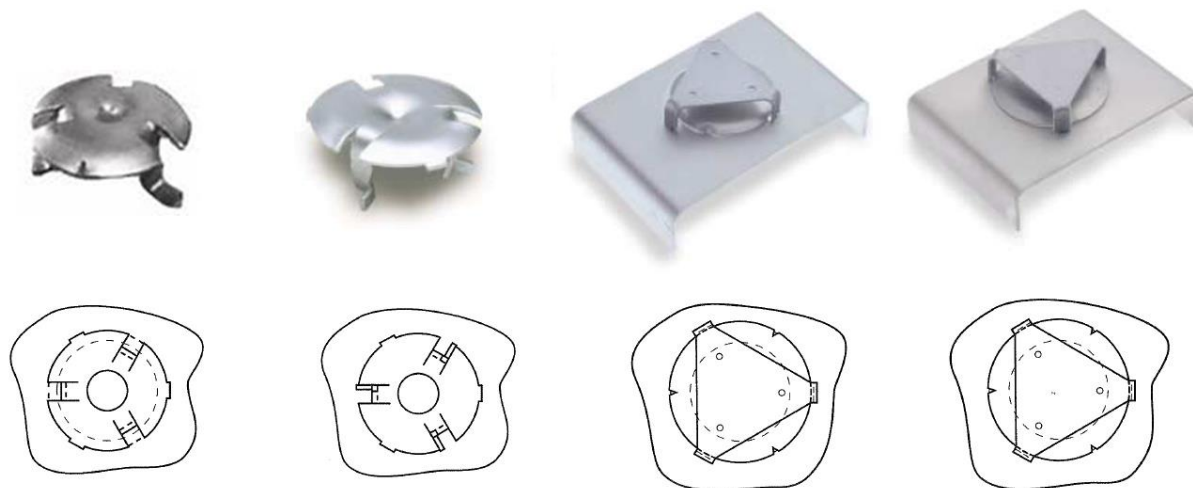
Obr. 19 Možná vnitřní uspořádání patrových kolon [42]

K nejpoužívanějším typům pater patří síťová, ventilová a kloboučková. Síťová nabízí právě zmíněné nízké tlakové ztráty, vysokou účinnost nebo snadnou údržbu. Zároveň se jedná o konstrukčně nejjednodušší z vyjmenovaných možností, jelikož jde v podstatě o kovovou desku s kruhovými otvory. Průměry těchto otvorů se obvykle pohybují v rozmezí 6-25 mm, nejčastěji se pak používají v intervalu 12-19 mm. Na druhou stranu mají oproti dalším alternativám malé turndown ratio, tedy parametr, který udává poměr maximálního a minimálního toku [43]. Kapacitní rozsah je tedy omezený.



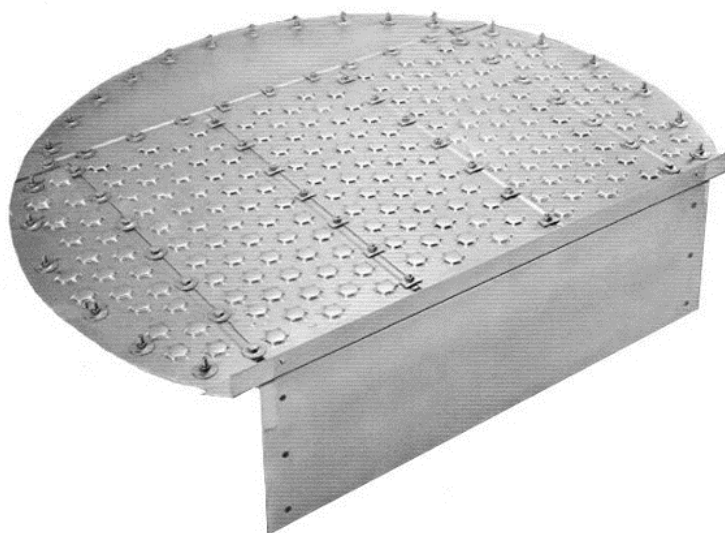
Obr. 20 Síťové patro [44]

Dalším typem pater jsou ventilová. Jsou složena z upevněných či mobilních ventilů, které reagují na měnící se tok plynu svým vertikálním pohybem. Je-li nízký, jsou v dolní poloze, naopak při vysokém průtoku přechází do horní polohy a plně se otevírají. Omezení pohybu je možné z obou stran patra, buď pomocí vodících nožek nebo určité formy klece. Mohou být kruhového, obdélníkového nebo i trojúhelníkového tvaru.



Obr. 21 Možné podoby elementů ventilových pater [45]

Přínosem tohoto typu oproti síťovým patrům je vyšší turndown ratio a efektivita, nevýhodou pak může být tendence k omezení pohybu ventilů v případě, že pracovní látka je náchylná k vytváření kalů, případně je korozivní. V neposlední řadě je i finančně náročnější [46].



Obr. 22 Ventilové patro [44]

Poslední zmíněnou alternativou jsou kloboučková (zvonková) patra, která se uplatňují již od počátku 19. století. Dříve patřily k nejpoužívanějším, nicméně postupně se od upustilo, především z důvodu vysokých nákladů a tlakové ztráty [47]. Každý element se skládá z komínku a kloboučku, který je ve své dolní části tvořen otvory nebo výřezy. Ty slouží k intenzifikaci styku mezi kapalinou a plynem. Zvonková patra jsou obvykle vhodná pro nižší průtoky kapaliny.



Obr. 23 Kloboučkové patro [48]

V následující tabulce je uvedeno porovnání jednotlivých možností mezi sebou. Plyne z ní, že síťová patra představují jakousi střední cestu, naopak nejhorší parametry se jeví u ventilové varianty. Oproti kloboučkovým patrům nicméně výrazně nižší pořizovací cenu.

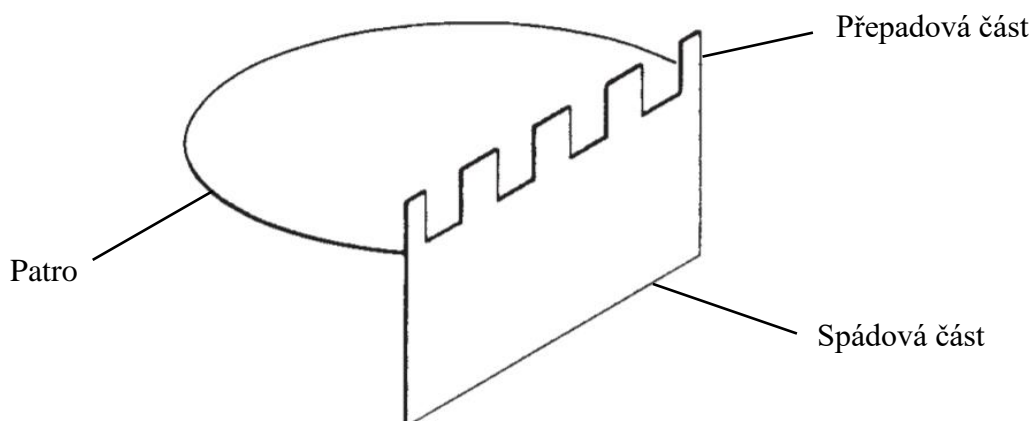
Tab. 5 Porovnání pater dle vybraných parametrů (převzato z [49])

Vlastnost	Síťová patro	Ventilová patro	Kloboučková patro
Kapacita	●●●○○	●●●○○	●●○○○
Účinnost	●●●○○	●●●○○	●●●○○
Tlaková ztráta	●●●○○	●●●○○	●●●○○
Turndown	●●●○○	●●●○○	●●●●●
Zanášení	●●●○○	●●○○○	●●●○○
Korozivnost	●●●○○	●●○○○	●●●○○
Materiál	●●●○○	●●●○○	●●●○○
Škálovatelnost	●●●○○	●●●○○	●●○○○
Údržba	●●●○○	●●●○○	●●●○○
Know-how	●●●●●	●●●●●	●●●●○
Náklady	●●●○○	●●●○○	●●○○○

●○○○○ Chabé ●●○○○ Slušné ●●●○○ Dobré ●●●●○ Velmi dobré ●●●●● Výborné

Bez ohledu na to, jaký typ je v koloně použit, se každé patro může skládat z přepadové a spádové části. Přepad zadržuje kapalinu na patře za účelem udržení požadované výšky hladiny. Obvykle bývá 2,5-10 cm vysoký, nižší varianty se využívají u kolon pracujících za nízkých tlaků [43]. Zároveň mohou obsahovat výřezy obdélníkového nebo trojúhelníkového tvaru, které nalézají uplatnění v nízkokapacitních věžích.

Spádová část slouží k vedení toku kapaliny z vyššího patra do nižšího, přičemž může být přímá nebo skloněná pod určitým úhlem. Úkolem této části je další oddělení plynu od kapaliny. Přímé vertikální skýtají jednoduchost a nízké náklady. Skloněné nalézají uplatnění v případě, že oddělení fází je složitější, např. z důvodu pění [42].



Obr. 24 Patro se spádovou a přepadovou částí obdélníkového výřezu [42]

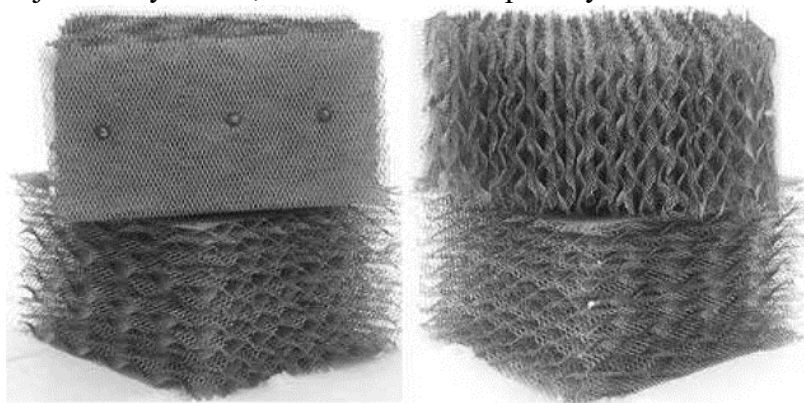
2.2.2 Plněné kolony

V praxi se u procesů absorpce a stripování nejčastěji uplatňují plněné kolony, obecně vhodnější pro zařízení menších průměrů. Zajišťují kontinuální kontakt mezi fázemi skrz velkou smočenou plochu. K tomu je využíváno nejrůznějších tvarů a materiálů. V porovnání s patrovými kolonami mají řadu výhod, k nimž patří [50]:

- nižší tlaková ztráta (spád),
- univerzálnost,
- nižší pořizovací náklady.

Výplňové kolony lze rozlišit na dva druhy – strukturované a sypané. První strukturované výplně se začaly objevovat v 60. letech minulého století. Byly z tkaniny a používaly se k náročným separačním procesům. O dekádu později přišly na trh varianty z plechu, které byly upravovány děrováním a lisováním. V dalších letech docházelo k postupnému vylepšování a uvádění nových materiálů, např. plastů.

Strukturované výplně vyžadují rovnoměrné rozdělení kapaliny po celém průřezu kolony. Na tento požadavek nicméně nejsou kladeny tak velké nároky jako v případě sypaných výplní. Jsou velmi vhodné pro nízké průtoky a nízké tlaky. V porovnání se sypanými náplněmi mají ve většině případů vyšší účinnost a kapacitu, ovšem i ta je omezená. Udává se, že je-li intenzita toku kapaliny vyšší než 25 m/h, vhodnější volbou jsou ventilová patra [51]. U zařízení s menšími průměry výplň tvoří disky, které pasují přesně do věže. V případě větších rozměrů se výplň skládá z jednotlivých dílů, které se složí skrz průlezy.



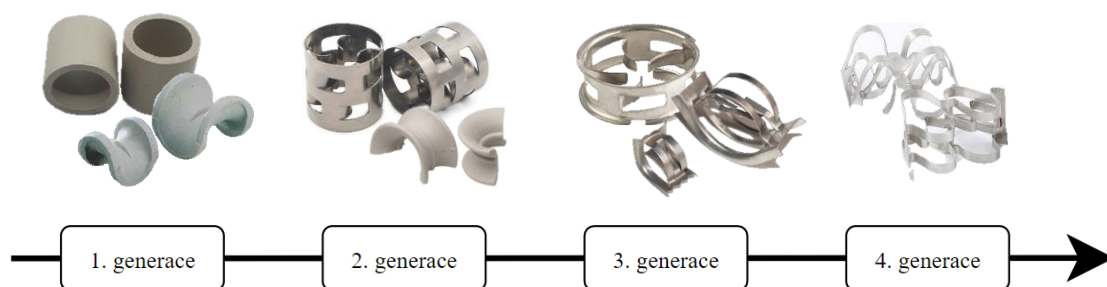
Obr. 25 Strukturované výplně [52]

Sypané výplně mají výrazně delší historii než strukturované. První druh výplně byl představen na počátku 20. století v dnešním Německu. Šlo o Raschigovy kroužky, které nahradily do té doby používané skleněné střepy nebo úlomky keramiky či porcelánu [11]. Tento druh první generace náplně je velmi jednoduchý, jde v podstatě o krátké trubky, jejichž délka je stejná jako vnější průměr. Ve 30. letech vstoupily na trh Berlova sedla a jako materiál se začala používat keramika.

Později v 60. letech nastoupily Pall kroužky, které byly efektivnější a měly menší tlakovou ztrátu, zvětšil se mezifázový povrch a s tím vzrostla i cena. Do té doby byly sypané výplně používány pouze do věží, jejichž průměr byl menší než 50 cm. Bylo to z toho důvodu, že u větších rozměrů docházelo k velkému snížení účinnosti a nerovnoměrnosti distribuce pracovních látek. S příchodem 2. generace bylo nicméně toto omezení překonáno [53].

Třetí generace byla inspirována tou první. Lze to pozorovat např. u druhů NOR-PAC nebo VSP. Objevovaly se ale i převratné návrhy, ke kterým patřil sférický Tri-Pack.

V současné době se vývoj nových druhů náplní stále posouvá kupředu. Za jednoho z nejvýznamnějších zástupců čtvrté generace lze považovat Raschig Super-Ring, který byl představen na přelomu tisíciletí. Nabízí nejlepší vlastnosti v oblastech tlakové ztráty, kapacity nebo i samotného přestupu hmoty [54].



Obr. 26 Vývoj elementů sypaných výplní

Každá výplň má své charakteristické vlastnosti, ke kterým patří velikost, mezerovitost, hmotnost jednotkového objemu, packing factor nebo materiál, ze kterého je vyrobena. Tím může být keramika, plast a kov.

Výplně z keramiky jsou levné, dobře smáčivé a korozivzdorné i za zvýšených teplot. K nevýhodám naopak patří křehkost a menší mezerovitost oproti jiným materiálům. Přestože jejich podíl na trhu klesá, mají stále své využití, hlavně u agresivnějších médií a vyšších teplot.

Plastové výplně jsou stejně jako keramické odolné vůči korozi. Navíc mají i větší mezerovitost, jelikož je možné vyrábět tenkostěnnější produkty, a jsou celkově lehčí. Na druhou stranu může být problémem horší smáčivost, především u malých průtoků. Ta lze zlepšit chemickou úpravou povrchu hydrofilizací, což má za následek zvýšení jinak poměrně nízké ceny [51]. Celkově se výplně z plastu využívají v široké škále procesů. K výrobě se dá používat polyethylen (PE), polyvinylchlorid (PVC) či polyvinylidenfluorid (PVDF). Nejpopulárnějším je ale polypropylen (PP), který není drahý a je vhodný do přibližně 120 °C [53]. U plastových výplní je prokázáno, že u nich během procesu dochází ke změnám ve vlastnostech, které zlepšují přenos hmoty. Po přibližně 150 hodinách provozu může dojít ke zlepšení o 20-30 % [55].

Nejpoužívanější jsou stále výplně kovové, především kvůli své pevnosti při zachování tenkostěnnosti a dobré smáčivosti. Lze je ale používat víceméně jen pro nekorodující látky a při teplotách do 100 °C [51].

Jak již bylo zmíněno, elementy výplní mohou mít různou velikost, např. Raschigovy kroužky se mohou pohybovat od 8 do 100 mm. K výběru správné velikosti a typu se dají využít některá pravidla. Výplně větší než 25 mm (1“) se obvykle používají pro průtok plynu větší než 0,25 m³/s, je-li tok více než 1 m³/s, doporučuje se výplň 50 mm [11]. Vyšší povrch pro přenos zároveň znamená větší odpor pro proud vzduchu, čímž se zvyšuje i tlaková ztráta. Ta, jak již bylo zmíněno v jedné z předchozích kapitol, by měla být ideálně do 400 Pa/m. Dále je výhodné navrhnout zařízení s výplní, která má iniciální tlakovou ztrátu velmi nízkou. To totiž znamená možný prostor pro případné zlepšení efektivity procesu změnou výplně za menší s větší přenosovou plochou [56]. Velikost elementu by se měla odvíjet i od průměru kolony. Pro minimalizaci vytváření proudů po stěnách kolony, které snižují efektivitu procesu, je vhodné, aby byl poměr průměru ku velikosti alespoň 10:1, v optimálním případě 15:1. Pro shrnutí:

- menší výplň znamená vyšší tlakovou ztrátu ale vyšší efektivitu,
- větší výplň znamená nižší efektivitu přenosu ale menší tlakovou ztrátu,
- příliš velká výplň má za následek stěnový efekt.

Vzájemné porovnání strukturované a sypané výplně je zobrazeno v tabulce Tab. 6. Z ní plyne, že obecně lepší volbou se může jevit první zmíněná možnost, ovšem vždy záleží na dané konkrétní aplikaci. Sypané náplně mohou být vhodnější do menších kolon u kterých může být problematické časté čištění, mají vyšší průtok kapaliny nebo je jako materiál preferovaný plast či keramika [36].

Tab. 6 Porovnání druhů výplní dle vybraných parametrů (převzato z [49])

Vlastnost	Sypaná výplň	Strukturovaná výplň
Kapacita	●●●○○	●●●●●
Účinnost	●●●●○	●●●●●
Tlaková ztráta	●●●●○	●●●●●
Turndown	●●●●○	●●●●○
Zanášení	●●○○○	●●○○○
Korozivnost	●●●○○	●○○○○
Materiál	●●●●●	●●●●○
Škálovatelnost	●●●●○	●●●●○
Údržba	●●○○○	●○○○○
Know-how	●●●●●	●●●●●
Náklady	●●○○○	●○○○○

●○○○○ Chabé ●●○○○ Slušné ●●●○○ Dobré ●●●●○ Velmi dobré ●●●●● Výborné

2.2.3 Další vnitřní vybavení

Ačkoliv patra či výplň jsou esenciální pro samotný proces absorpce, desorpce, nebo i jiný, kolona se neobejde bez dalších zařízení. Mezi ně může patřit:

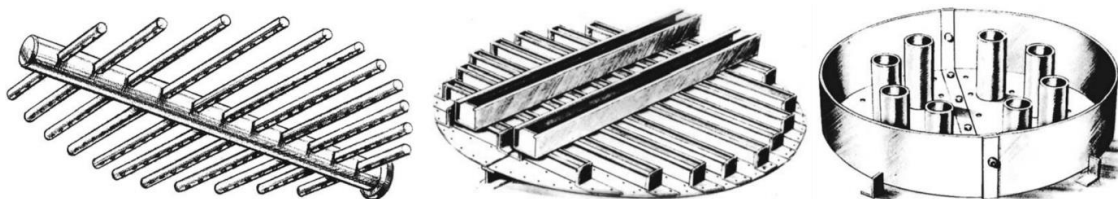
- distributor kapaliny,
- redistributor kapaliny,
- distributor plynu,

- nosný rošt,
- demister.

Distributor kapaliny

Rozdělovače kapalin slouží k rovnoměrnému pokrytí patra nebo výplně touto fází. Jde o významnou součást, protože právě rovnoměrnost hraje důležitou roli ve správném fungování kolony. Distributory lze dělit na 3 kategorie (viz Obr. 27) [51]:

- trubkové,
- žlabové,
- deskové.



Obr. 27 Základní druhy distributorů [42]

Trubkové rozdělovače nabízí široký rozsah pracovních průtoků a jsou poměrně levné. Kapalina je přiváděna do trubek, ze kterých na spodní straně dochází k jejímu rovnoměrnému vytékání. Nevýhodou tohoto typu je případná náchylnost ke korozi a erozi. Pokud je v kapalině přítomna i pevná fáze, může dojít k ucpání některých otvorů [42].

Obsahuje-li kapalina pevné částice, je vhodné použít žlabové distributory. Na rozdíl od trubkových je pro rovnoměrnou distribuci nutné zajistit vodorovné uložení. Dá se říci, že funguje na principu kaskády. Kapalina přitéká do horních pater, odkud přetéká do nižších. Otvory mohou být různého typu, nejčastěji kruhové a trojúhelníkové. Z důvodu možného zanášení se nedoporučuje umisťovat otvory na dna, ale po stranách žlabů [51].

U deskových distributorů kapalina vytéká skrz velké množství otvorů malých průměrů v desce, zatímco plyn je odváděn trubkami. Ty musí být dostatečně vysoké pro případ velkých průtoků kapaliny, aby nedošlo k jejich zahlcení. Opět platí, že uložení by mělo být vodorovné, především v případě nízkých průtoků.

Počet samotných otvorů se samozřejmě odvíjí od rozměrů kolony, nicméně platí, že jejich minimální počet by měl být 40 na metr čtvereční [57]. Tento počet by ale neměl být příliš velký, protože by to znamenalo menší průměr otvoru a tím větší náchylnost k jejich ucpání.

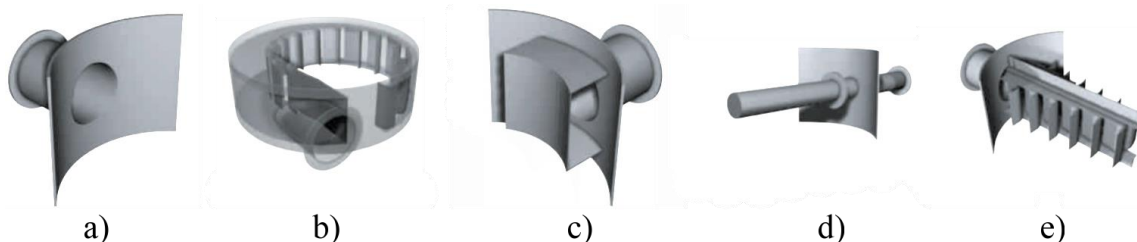
Redistributor kapaliny

Redistributor je nepovinnou součástí kolony, která slouží k sběru kapaliny, jež se během stékání skrz výplň přesunula ke stěně. Jeho funkcí je tedy opětovné rovnoměrné rozdělení kapaliny po celém průřezu zařízení. Je vhodný hlavně v případech velkého průměru věže. Zároveň plní funkci nosného roštu výplně.

Maximální výška výplně bez redistributoru záleží na procesu a použité výplni, např. při použití Raschigových kroužků by výška neměla přesáhnout trojnásobek průměru kolony, u Pall kroužků pak až desetinásobek [23]. S novějšími generacemi výplní se tedy tato hodnota zvyšuje. V případě velkoformátových věží by měl být zahrnut i faktor hmotnosti výplně.

Distributor plynu

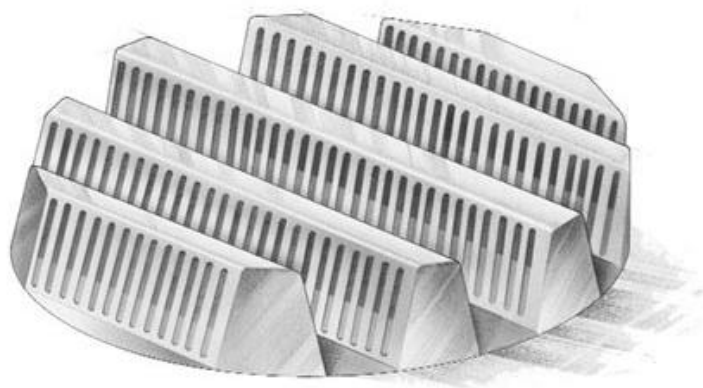
Správné rovnoměrné pokrytí průřezu kolony plynem je podobně důležité jako v případě kapaliny. Samotný přívod plynu může být proveden více způsoby, jak je zobrazeno na Obr. 28. Ideální prostředek, jakým určit vhodný přívod plynu, je pomocí CFD simulace.



Obr. 28 Způsoby přívodu plynu

a) otevřený, b) cyklonový, c) rozstříkový, d) trubkový, e) lamelový [58]

Nad přívodem je nosný rošt, který kromě své primární funkce podpory výplně také napomáhá k rovnoměrnému rozdělení plynu. U sypaných výplní se nejčastěji používá tzv. gas injection typ, který je vyobrazen na obrázku níže. V případě strukturovaného typu kolony se jako rošt využívá jednoduché konstrukce mřížek.



Obr. 29 Nosný rošt typu gas injection [59]

Demister

Další součástí, která může být v kolonách použita, je odlučovač kapek, demister. Jde o zařízení, které brání průniku kapaliny do výstupního plynu. Podle velikosti zachycených kapek je lze dělit na:

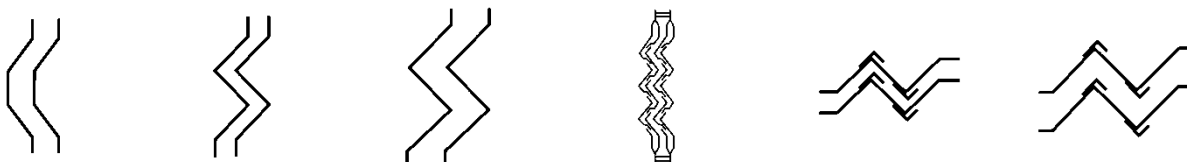
- vírníky – nad 50 μm ,
- lamelové – nad 10 μm ,
- elektrostatické – nad 2 μm ,
- vláknové – nad 0,8 μm [60].

Při výběru daného typu demisteru se bere v potaz několik faktorů, jako je účinnost, tlaková ztráta, náchylnost k zanášení nebo použitý materiál.

Vírníky nepatřily mezi nejpoužívanější typ demisteru, nicméně v poslední době se těší větší oblibě, jelikož mají řadu výhod. Jsou především velmi účinné za vysokých tlaků a jsou schopné pojmout velký tok pracovního média. Fungují na principu využívání setrvačné odstředivé síly,

pomocí které se kapalina shlukuje po stěnách a poté je odváděna ven. Plyn ovlivněn není z důvodu mnohonásobně menší hustoty.

Lamelové odlučovače jsou tvořeny lamelami určitých rozestupů, které mohou být různých tvarů. Plyn proudí skrz lamely, které ho nutí neustále měnit směr. Protože kapky obsažené v plynu nejsou schopny na změnu tvaru reagovat stejně rychle jako plyn, zachytávají se na lamelách, kde postupně formují větší kapky. Ty poté mohou stékat zpět do kolony. Základní profily jsou zobrazeny na Obr. 30.



Obr. 30 Příklady profilů lamelového odlučovače [61]

Elektrostatické odlučovače využívají působení elektrostatických sil na částice s elektrickým nábojem. Plyn je ionizován koronovým výbojem, který vzniká na ostrých hranách elektrod. Právě v těchto místech se generuje silné elektrické pole. Částice kapaliny přijímají na svém povrchu ionty nebo volné elektrony, čímž se stávají nabitými. Protože jde většinou o záporný náboj, usazují se na anodě [62].

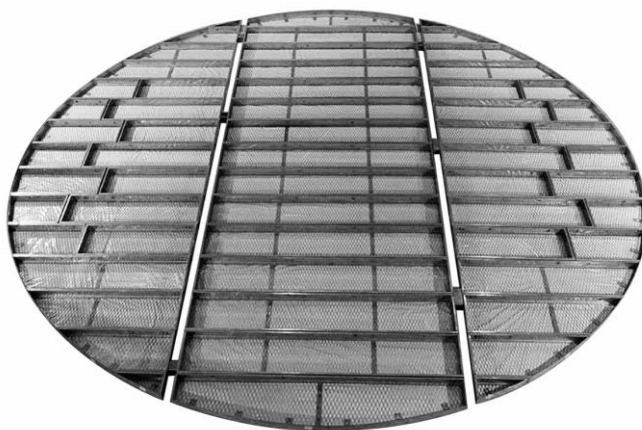
Vláknové demistery (viz Obr. 31) patří k populárním řešením, přičemž fungují na podobném principu jako lamelové rozdělovače. Jsou složeny z hustého pletiva nebo textilní vložky, do kterých kapalina naráží a zachycuje se. Způsob výroby je odlišný od každého výrobce, s čímž souvisí i efektivita. V některých případech je v jednom odlučovači využito více materiálů za účelem zachycení více druhů látek, může se skládat z nerezové oceli, titanu, hliníku, mědi nebo plastů.



Obr. 31 Pletený odlučovač kapaliny [63]

Záchytná zařízení

Kolony mohou obsahovat i záchytná zařízení, která slouží k určité fixaci výplně a brání jejímu nežádoucímu pohybu a unášení mimo pracovní oblast. Tato zařízení mohou být umístěna přímo na výplň nebo na pomocnou konstrukci věže. První možnost se využívá v případě použití keramických výplní, druhá pak u ocelových a plastových výplní, jako prevence případného mechanického poškození. Základní záchytné zařízení je zobrazeno na Obr. 32.



Obr. 32 Záchytné zařízení pro sypané výplně [64]

3 Návrhový výpočet

Cílem této diplomové práce je navržení stripovací jednotky na čištění čpavkové vody vznikající jako destilát při odpařování fugátu. Požadavky na jednotku jsou dány potřebami LENP, kde by měla stripovací jednotka navazovat na již provozovanou odparku zpracovávající fugát. Stripovací jednotka by měla být připravena na kontinuální provoz při zpracovatelské kapacitě 50 l/hod. Počáteční koncentrace amoniaku ve vodě je 3000 mg/l, přičemž je požadováno snížení na 50 mg/l, tedy o přibližně 98,3 %. Omezení je v podobě výšky, která by neměla přesahovat 1,5 m. Jako pracovní podmínky byl zvolen tlak 101,325 kPa a teplota 25 °C.

Tab. 7 Vstupní parametry stripovací jednotky

Parametr	Hodnota	Jednotka
Teplota	25	°C
Tlak	101,325	kPa
Průtok vody	50	l/h
Počáteční koncentrace amoniaku	3000	mg/l
Cílová koncentrace amoniaku	50	mg/l

3.1 Henryho konstanta

Jako první krok je určení Henryho konstanty. K tomu poslouží kompilace tohoto parametru a vzájemné převodní vztahy dle [65] a [66]. Pro amoniak při teplotě 25 °C platí $H^{cp}=62 \text{ M/atm}$ [66]. V dalším postupu je nicméně potřeba bezrozměrná veličina K^{cc} . Pro přepočtení se využije tabulky Tab. 8. Znak H představuje Henryho konstantu rozpustnosti, znak K pak Henryho konstantu těkavosti.

Tab. 8 Převodní veličiny pro Henryho konstanty [65]

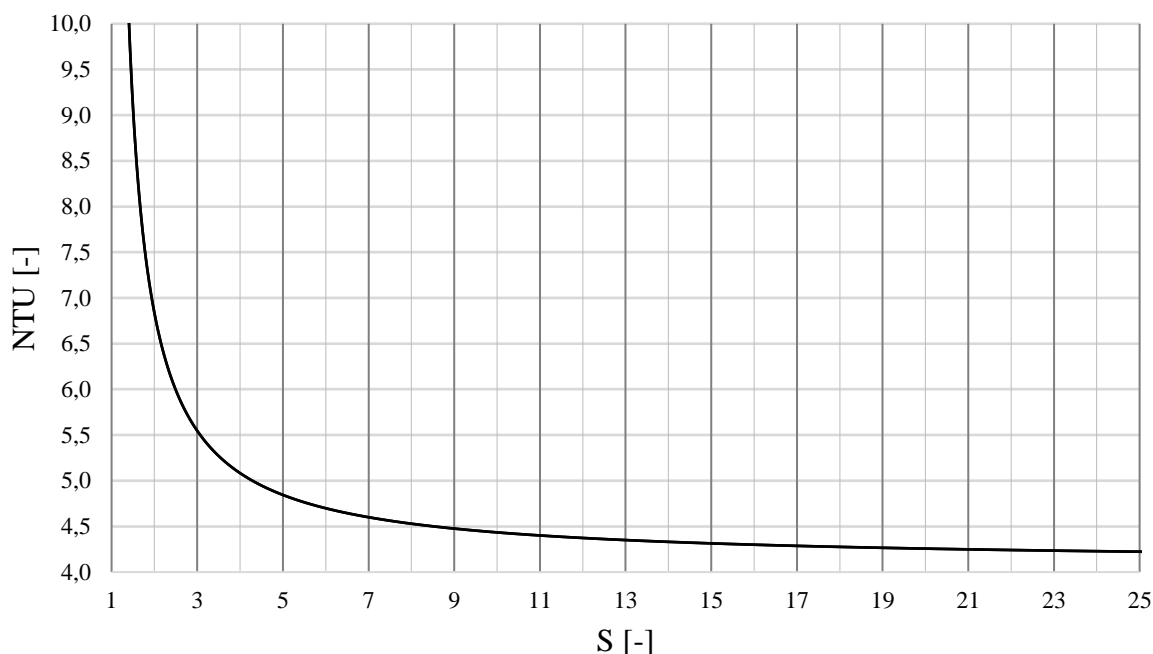
	H^{cp} $\left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \cdot \text{Pa}} \right]$	H^{cp} $\left[\frac{\text{M}}{\text{atm}} \right]$	H^{cc} $[-]$	H^{bp} $\left[\frac{\text{mol}}{\text{kg} \cdot \text{Pa}} \right]$	H^{bp} $\left[\frac{\text{mol}}{\text{kg} \cdot \text{atm}} \right]$	H^{xp} $[\text{atm}^{-1}]$
K^{px} $[\text{atm}]$	0,546182	55,3419	1353,96	5,47826E-4	55,5084	1
K^{pc} $\left[\frac{\text{m}^3 \cdot \text{Pa}}{\text{mol}} \right]$	1	101,325	2478,96	1,00301E-3	101,630	1,83089
K^{pc} $\left[\frac{\text{m}^3 \cdot \text{atm}}{\text{mol}} \right]$	9,86923E-6	1E-3	0,0244654	9,89893E-9	1,00301E-3	1,80695E-5
K^{cc} $[-]$	4,03395E-4	0,0408740	1	4,04604E-7	0,0409970	7,38573E-4

Po převodu tedy vychází:

$$K^{cc} = \frac{0,0408740}{H^{cp}} = \frac{0,0408740}{62} = 0,000659 \quad (3.1)$$

3.2 Stripovací faktor

Dalším krokem je zvolení stripovacího faktoru, od kterého se odvíjí potřebné množství vzduchu a hodnota parametru NTU. Některé zdroje uvádí možný rozsah stripovacího faktoru v intervalu 2-20, nicméně větší množství odborné literatury (např. [13] nebo [50]) doporučuje stripovací faktor v nižších jednotkách. Vzhledem k Obr. 33, který zobrazuje závislost S a NTU, je zvolen jako 5, kdy víceméně dochází ke zploštění křivky.



Obr. 33 Závislost stripovacího faktoru na NTU

Tato závislost je popsána vztahem:

$$NTU = \frac{S}{S-1} \ln \left[\frac{1 + \frac{x_2}{x_1}(S-1)}{S} \right] \quad (3.2)$$

Pro $S=5$ tedy platí:

$$NTU = \frac{5}{5-1} \ln \left[\frac{1 + \frac{3000}{50}(5-1)}{5} \right] = 4,844 \quad (3.3)$$

3.3 Množství plynu

Jako stripovací plyn byl na základě zadání zvolen vzduch. Jeho potřebné množství se určí, jak již bylo zmíněno, pomocí právě zvoleného stripovacího faktoru. Ten je totiž také stanoven jako:

$$S = \frac{G}{L} K^{cc} \quad (3.4)$$

kde L a G jsou objemové průtoky kapaliny, resp. plynu a K^{cc} je Henryho konstanta.

Po úpravě a dosazení tedy:

$$G = \frac{L \cdot S}{K^{cc}} = \frac{0,05 \cdot 5}{0,000659} = 379,21 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (3.5)$$

3.4 Průměr kolony

Dalším krokem v postupu je stanovení průměru uvažované kolony. Ten je dán jako:

$$D_{min} = \left[\frac{4G}{f v_{GF} \pi} \right]^{0,5} \quad (3.6)$$

kde:

G	$[\text{m}^3/\text{s}]$	objemový průtok plynu,
f	$[-]$	úroveň zahlcení (obvykle v rozmezí 0,5-0,7),
v_{GF}	$[\text{m/s}]$	kritická rychlost plynu při zahlcení.

Zmíněné zahlcení znamená, že při příliš velkých rychlostech proudění plynu dochází k bránění kapaliny ve stékání, která se pak akumuluje v koloně. Rychlost plynu právě při zahlcení je stanovena jako:

$$v_{GF} = \frac{C_S}{\left[\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \right]^{0,5}} \quad (3.7)$$

kde:

C_S	$[\text{m/s}]$	kapacitní konstanta,
ρ_G	$[\text{kg/m}^3]$	hustota plynu,
ρ_L	$[\text{kg/m}^3]$	hustota kapaliny.

Zmíněná konstanta je dána jako:

$$C_S = \sqrt{\frac{Y_F}{F_p \mu_L^{0,1}}} \quad (3.8)$$

kde:

Y	$[-]$	ypsilonová souřadnice Eckertova diagramu,
F_p	$[\text{ft}^2/\text{ft}^3]$	faktor výplně,
μ_L	$[\text{Pa} \cdot \text{s}]$	dynamická viskozita kapaliny.

Jelikož se hledá rychlost plynu při zahlcení, odpovídající křivku z Eckertova diagramu (viz obrázek 13) lze popsat pomocí funkce [11]:

$$\ln Y_F = - \left[3,5021 + 1,028 \cdot \ln X + 0,11093 \cdot (\ln X)^2 \right] \quad (3.9)$$

Přičemž hodnota X :

$$X = \frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0,5} \quad (3.10)$$

Po dosazení:

$$X = \frac{0,014}{0,124} \cdot \left(\frac{1,18}{997} \right)^{0,5} = 0,004 \quad (3.11)$$

Průtoky pracovních medií L' a G' jsou dosazeny jako kg/s. Hodnoty hustot byly stanoveny dle tabulek v literatuře [67].

$$\ln Y_F = - \left[3,5021 + 1,028 \cdot \ln 0,004 + 0,11093 \cdot (\ln 0,004)^2 \right] = 0,296 \quad (3.12)$$

Faktor výplně se odvíjí od použité výplně v koloně. Po předchozí konzultaci byl stanoven typ Raschig Super-ring velikosti 1“ z oceli, který může být použit právě i pro amoniak [54]. Potřebné údaje jsou v tabulce níže [14].

Tab. 9 Výběr parametrů výplně Raschig Super-rings, upraveno dle [14]

Velikost	F_p [ft ² /ft ³]	a [m ² /m ³]	ε [m ² /m ³]	C_h [-]	C_p [-]	C_L [-]
0,5“		250	0,975	0,620	0,780	1,450
1“	62	160	0,980	0,750	0,500	1,290
2“		97,6	0,985	0,720	0,464	1,323
3“		80	0,982	0,620	0,430	0,850

Po dosazení do vztahu (3.8):

$$C_s = \sqrt{\frac{0,296}{62 \cdot 0,000889 I^{0,1}}} = 0,155 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.13)$$

Kritická rychlost:

$$v_{GF} = \frac{0,155}{\left[\frac{1,18}{997 - 1,18} \right]^{0,5}} = 4,495 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.14)$$

Minimální průměr je pak:

$$D_{min} = \left[\frac{4 \cdot \frac{379,21}{3600}}{0,5 \cdot 4,495 \cdot \pi} \right]^{0,5} = 0,244 \text{ m} \quad (3.15)$$

Aby se předešlo nežádoucímu efektu, kdy má kapalina tendenci stékat ke stěně kolony, měl by průměr kolony být minimálně desetinásobek velikosti elementu vybrané výplně. Jelikož velikost výplně je 1“, tedy přibližně 25 mm, pak je průměr kolony stanoven na 0,25 m. Průřez je poté dán jako:

$$A = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{0,25}{2} \right)^2 = 0,049 \text{ m}^2 \quad (3.16)$$

3.5 Tlaková ztráta

S ohledem na zvolenou úroveň zahlcení je potřeba ověřit, zda není překročena doporučená tlaková ztráta. K tomu je potřeba nejprve určit tzv. suchou tlakovou ztrátu, kdy není v koloně přítomna kapalina [11]:

$$\frac{\Delta P_0}{Z} = \psi_0 \frac{a}{\varepsilon^3} \frac{\rho_G (f v_{GF})^2}{2} \frac{1}{K_W} \quad (3.17)$$

kde:

ΔP_0	[Pa]	suchá tlaková ztráta,
Z	[m]	výška výplně,
ψ_0	[m/s]	koeficient odporu suché výplně,
a	[m ² /m ³]	vlastní specifický povrch náplně,
ε	[m ² /m ³]	mezerovitost náplně,
ρ_G	[kg/m ³]	koeficient odporu suché výplně,
f	[-]	úroveň zahlcení,
v_{GF}	[m/s]	kritická rychlost plynu při zahlcení,
K_W	[-]	faktor stěny.

Koeficient odporu suché výplně je dán jako:

$$\psi_0 = C_p \left(\frac{64}{Re_G} + \frac{1,8}{Re_G^{0,08}} \right) \quad (3.18)$$

kde:

C_p	[-]	konstanta výplně (viz Tab. 9),
Re_G	[-]	Reynoldsovo číslo plynu.

Reynoldsovo číslo je pro tento případ stanoveno jako:

$$Re_G = \frac{f v_{GF} d'_p \rho_G K_W}{(1 - \varepsilon) \mu_G} \quad (3.19)$$

kde d'_p představuje efektivní velikost elementu výplně (m), pro který platí:

$$d'_p = 6 \left(\frac{1 - \varepsilon}{a} \right) \quad (3.20)$$

Faktor stěny:

$$\frac{1}{K_W} = 1 + \frac{2}{3} \left(\frac{1}{1 - \varepsilon} \right) \frac{d'_p}{D} \quad (3.21)$$

Po dosazení:

$$d'_p = 6 \cdot \left(\frac{1 - 0,980}{160} \right) = 0,00075 \text{ m} \quad (3.22)$$

$$K_W = \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{1}{1 - 0,980} \right) \cdot \frac{0,00075}{0,25}} = 0,909 \quad (3.23)$$

$$Re_G = \frac{0,5 \cdot 4,495 \cdot 0,00075 \cdot 1,18 \cdot 0,909}{(1 - 0,980) \cdot 1,86 \cdot 10^{-5}} = 4860,456 \quad (3.24)$$

$$\psi_0 = 0,5 \cdot \left(\frac{64}{4860,456} + \frac{1,8}{4860,456^{0,08}} \right) = 0,463 \quad (3.25)$$

$$\frac{\Delta P_0}{l} = 0,463 \cdot \frac{160}{0,98^3} \cdot \frac{1,18 \cdot (0,5 \cdot 4,495)^2}{2} \cdot \frac{1}{0,909} = 257,961 \frac{\text{Pa}}{\text{m}} \quad (3.26)$$

Při vstupu kapaliny dojde ke zvýšení tlakové ztráty. Poměr suché a mokré tlakové ztráty je stanoven jako:

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_0} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - h_L} \right)^{1,5} \exp \left(\frac{Re_L}{200} \right) \quad (3.27)$$

kde parametr h_L představuje zádrž kapaliny v m^3 na m^3 kolony. Jde o množství kapaliny, která je přítomna ve volném meziprostoru výplně.

$$h_L = \left(12 \frac{Fr_L}{Re_L} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{a_h}{a} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3.28)$$

kde:

Fr_L	[-]	Froudeho číslo kapaliny,
Re_L	[-]	Reynoldsovo číslo kapaliny,
a_h	$[\text{m}^2/\text{m}^3]$	hydraulický specifický povrch náplně,
a	$[\text{m}^2/\text{m}^3]$	vlastní specifický povrch náplně.

Uvedená podobnostní čísla jsou dána jako [11]:

$$Fr_L = \frac{0,01^2 a}{9,8} \quad (3.30)$$

$$Re_L = \frac{0,01}{3 \cdot 10^{-6} a} \quad (3.31)$$

Po dosazení:

$$Fr_L = \frac{0,01^2 \cdot 160}{9,8} = 1,633 \cdot 10^{-3} \quad (3.30)$$

$$Re_L = \frac{0,01}{3 \cdot 10^{-6} \cdot 160} = 20,833 \quad (3.31)$$

Protože platí, že $Re_L > 5$, poměr hydraulického a vlastního specifického povrchu náplně je stanoven následovně:

$$\frac{a_h}{a} = 0,85 C_h Re_L^{0,25} Fr_L^{0,1} \quad (3.32)$$

Po dosazení:

$$\frac{a_h}{a} = 0,85 \cdot 0,75 \cdot 20,833^{0,25} \cdot (1,633 \cdot 10^{-3})^{0,1} = 0,717 \quad (3.33)$$

$$h_L = \left(12 \cdot \frac{1,633 \cdot 10^{-3}}{20,833} \right)^{\frac{1}{3}} (0,717)^{\frac{2}{3}} = 0,078 \quad (3.34)$$

Po úpravě rovnice (3.27) je tlaková ztráta:

$$\Delta P = \left(\frac{0,98}{0,98 - 0,078} \right)^{1,5} \exp \left(\frac{20,833}{200} \right) \cdot 257,961 = 324,464 \frac{\text{Pa}}{\text{m}} \quad (3.35)$$

Tlaková ztráta se tedy nachází v doporučeném intervalu 200-400 Pa/m.

3.6 Celkový koeficient prostupu hmoty

K dalšímu postupu je potřeba stanovení celkového koeficientu přestupu hmoty, který slouží k určení HTU a tím tedy dále i potřebné výšky výplně.

$$K_L a = \left(\frac{1}{k_L a} + \frac{1}{k_G a K^{cc}} \right)^{-1} \quad (3.36)$$

Koeficient přestupu hmoty pro kapalnou fázi je dán, jak již bylo stanoveno v kapitole 2.1 jako:

$$k_L = 0,0051 \left(\frac{L^*}{a_w \mu_L} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_L} \right)^{-\frac{1}{2}} (ad_p)^{0,4} \left(\frac{\rho_L}{\mu_L g} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (3.37)$$

Hodnoty dynamických viskozit kapaliny a plynu byly stanoveny dle tabulek literatury [68], resp. [69], průtok vody byl přepočítán na průřez kolony, tedy jako kg/m²s. Dále v rámci zjednodušení byl zaveden předpoklad, že 1 l vstupní vody váží 1 kg. Ve vztahu (3.37) figuruje i smočený specifický povrch náplně, který byl taktéž zmíněn v kapitole 2.1. Příslušná hodnota povrchového napětí materiálu je stanovena dle tabulky 4, povrchové napětí vody při dané teplotě pak dle literatury [70]:

$$a_w = a \left\{ 1 - \exp \left[-1,45 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_L} \right) \left(\frac{L^*}{a \mu_L} \right)^{0,1} \left(\frac{L^{*2} a}{\rho_L^2 g} \right)^{-0,05} \left(\frac{L^{*2}}{\rho_L \sigma_L a} \right)^{0,2} \right] \right\} \quad (3.38)$$

Po dosazení:

$$a_w = 160 \left\{ 1 - \exp \left[-1,45 \left(\frac{0,075}{0,072} \right) \left(\frac{\frac{50}{0,049 \cdot 3600}}{160 \cdot 0,00089} \right)^{0,1} \left(\frac{\left(\frac{50}{0,049 \cdot 3600} \right)^2 \cdot 160}{997^2 \cdot 9,81} \right)^{-0,05} \left(\frac{\left(\frac{50}{0,049 \cdot 3600} \right)^2}{997 \cdot 0,072 \cdot 160} \right)^{0,2} \right] \right\} \quad (3.39)$$

$$a_w = 40,664 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}$$

Difusní koeficient v kapalině D_L byl stanoven dle Hayduk-Laudieho korelace [19]:

$$D_L = \frac{13,26 \cdot 10^{-5}}{\mu_s^{1,4} V_D^{0,589}} \quad (3.40)$$

Hodnota molárního objemu amoniaku při normální teplotě varu (239,82 K) byla stanovena na základě odborného článku [71].

$$D_L = \frac{13,26 \cdot 10^{-5}}{0,89^{1,4} \cdot 24,969^{0,589}} = 2,346 \cdot 10^{-9} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.41)$$

Po dosazení všech hodnot:

$$k_L = 0,0051 \cdot \left(\frac{50}{\frac{0,049 \cdot 3600}{40,664 \cdot 0,00089}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{0,00089}{997 \cdot 2,346 \cdot 10^{-9}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (160 \cdot 0,025)^{0,4} \cdot \left(\frac{997}{0,00089 \cdot 9,81} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (3.42)$$

$$k_L = 3,696 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dalším krokem je určení koeficientu přestupu hmoty pro plynnou fázi:

$$k_G = 5,23 (aD_G) \left(\frac{G^*}{a\mu_G} \right)^{0,7} \left(\frac{\mu_G}{\rho_G} \right)^{\frac{1}{3}} (ad_p)^{-2} \quad (3.43)$$

Tok plynu G^* je opět stanoven na průřez kolony, hodnota difusního koeficientu v plynu byla získána na základě literatury [72].

$$k_G = 5,23 \cdot (160 \cdot 2,28 \cdot 10^{-5}) \cdot \left(\frac{379,214 \cdot 1,18}{\frac{3600 \cdot 0,049}{160 \cdot 1,84 \cdot 10^{-5}}} \right)^{0,7} \cdot \left(\frac{1,84 \cdot 10^{-5}}{997} \right)^{\frac{1}{3}} (160 \cdot 0,025)^{-2} \quad (3.44)$$

$$k_G = 1,190 \cdot 10^{-1} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.45)$$

Nyní již jsou známy všechny parametry k určení celkového koeficientu přestupu hmoty:

$$K_L a = \left(\frac{1}{3,696 \cdot 10^{-5} \cdot 40,664} + \frac{1}{0,119 \cdot 40,664 \cdot 0,000659} \right)^{-1} = 1,022 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} \quad (3.46)$$

3.7 Výška výplně

Následujícím krokem je stanovení výšky výplně. K tomu je nejdříve potřeba určit parametr HTU – Height of Transfer Unit (viz rovnice 2.43):

$$HTU = \frac{L}{AK_L a} \quad (3.47)$$

Po dosazení:

$$HTU = \frac{1,389 \cdot 10^{-5}}{0,049 \cdot 1,022 \cdot 10^{-3}} = 0,277 \text{ m} \quad (3.48)$$

Výška výplně je pak dána jako:

$$Z = NTU \cdot HTU \quad (3.49)$$

Po dosazení vypočítaných hodnot:

$$Z = 4,844 \cdot 0,277 = 1,342 \text{ m} \quad (3.50)$$

3.8 Shrnutí výsledků

Další stránka této diplomové práce obsahuje tabulku shrnující vybrané parametry a výsledky dosažené v návrhovém výpočtu. Zahrnuje jak data výplně, tak i samotné kolony. Plyne z ní, že při použité výplni je splněn požadavek na maximální dovolenou výšku výplně, tj. 1,5 m. Stejně tak nebyla překročena doporučená tlaková ztráta, která by se měla pohybovat do 400 Pa/m. Lze

tedy konstatovat, že klíčové parametry v podobě stripovacího faktoru a úrovně zahlcení kolony byly zvoleny vhodně.

Výslednými produkty jsou tedy dekontaminovaná voda a znečištěný plyn. Plyn je možné zachytávat např. do roztoku kyseliny sírové k přípravě síranu amonného (touto částí procesu se již práce nezabývá). Další možná použití jsou zmíněna v kapitole 1.

Tab. 10 Parametry navržené kolony

Parametr	Označení	Hodnota
<i>Obecné</i>		
Stripovací faktor	S	5
Průtok kapaliny	L	0,05 m ³ /h
Průtok plynu	G	379,21 m ³ /h
Tlaková ztráta	ΔP	324,46 Pa/m
Úroveň zahlcení	f	0,5
Celkový koef. prostupu hmoty	K_{La}	$1,022 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$
<i>Výplň</i>		
Typ		Raschig Super-ring
Velikost	d_p	25 mm (1")
Materiál		Ocel
Faktor výplně	F_p	25 ft ² /ft ³
Specifický povrch	a	160 m ² /m ³
Mezerovitost	ε	0,980
<i>Kolona</i>		
Průměr	D	0,250 m
Průřez	A	0,049 m ²
Počet přenosových jednotek	NTU	4,844
Výška přenosové jednotky	HTU	0,277 m
Výška výplně	Z	1,342 m

3.9 Provedení výpočtu

K vytvoření a uskutečnění návrhového výpočtu byl použit tabulkový procesor Microsoft Excel, verze 2104. Jde obecně o velmi rozšířený software s širokou škálou využití nejen v oblasti inženýrství.

Sestavený výpočet je složen z více listů obsahující vstupní a výstupní parametry a dílčí výpočty. Zároveň je možné jej využít i pro další kalkulace, které počítají např. s jiným kontaminantem, výplní, či průtokem. Ukázka souboru je zobrazena na Obr. 34.

3 NÁVRHOVÝ VÝPOČET

Automatické ukládání ☐ Návrhový výpočet stripovací jednotky Florian Tibor (182600) FT

Soubor Domů Vložení Rozložení stránky Vzorce Data Revize Zobrazení Nápověda Sdílet Komentáře

E2 : X ✓ ✖ amoniak

Vstupní veličiny				Výstupní veličiny			
2	Kontaminant		amoniak	Henryho konstanta pro 25 °C			
3	Molární hmotnost vody		18,01528 g/mol	$K_{a,cc}$ [-]		0,000696	
4	Molární hmotnost kontaminantu		17,031 g/mol	Stripping factor			
5	Molární objem kontaminantu při normální teplotě varu		24,969 cm ³ /mol	S [-]		5	
6	Molární hmotnost vzduchu		28,96 g/mol	Overall mass transfer coefficient			
7	Vstup vody		50 l/h	$K_L a$ [s ⁻¹]		1,04E-03	
8			0,05 m ³ /h	Height of Transfer Unit			
9			1,38889E-05 m ³ /s	HTU [m]		0,272	Number of Transfer Units
10	Počáteční koncentrace kontaminantu		3000 mg/l	NTU [-]		4,844199	
11	mol. koncentrace kontaminantu		0,176149375 mol/l	Výška výplně			
12	mol. koncentrace vody		55,50843506 mol/l	Z [m]		1,3174	
13	mol. zlomek amoniaku		0,003163342 -	Průměr kolony			
14	Cílová koncentrace kontaminantu		50 mg/l	D [m]		0,250	Průřez kolony
15	mol. koncentrace kontaminantu		0,002935823 mol/l	A [m ²]		0,049	
16	mol. zlomek kontaminantu		5,28869E-05 -	Průřez kolony			
17	Zvolené veličiny			Průřez kolony			
18	Teplota		25 °C	Průřez kolony			
19	Hustota plynu za dané teploty		1,18 kg/m ³	Průřez kolony			
20	Hustota vody za dané teploty		997 kg/m ³	Průřez kolony			
21	Dynamická viskozita plynu za dané teploty		0,00001837 Pa*s	Průřez kolony			
22	Dynamická viskozita vody za dané teploty		0,0008891 Pa*s	Průřez kolony			
23	Povrchové napětí vody za dané teploty		0,072 N/m	Průřez kolony			
24	Výplň		Raschig Super-ring	Průřez kolony			
25	Velikost výplně		0,025 m	Průřez kolony			
26				Průřez kolony			

Stripování Stripovací faktor a NTU Součinitel prostupu hmoty Průměr kolony

Připraven Nastavení zobrazení 100 %

Obr. 34 Návrhový výpočet v rozhraní Excel

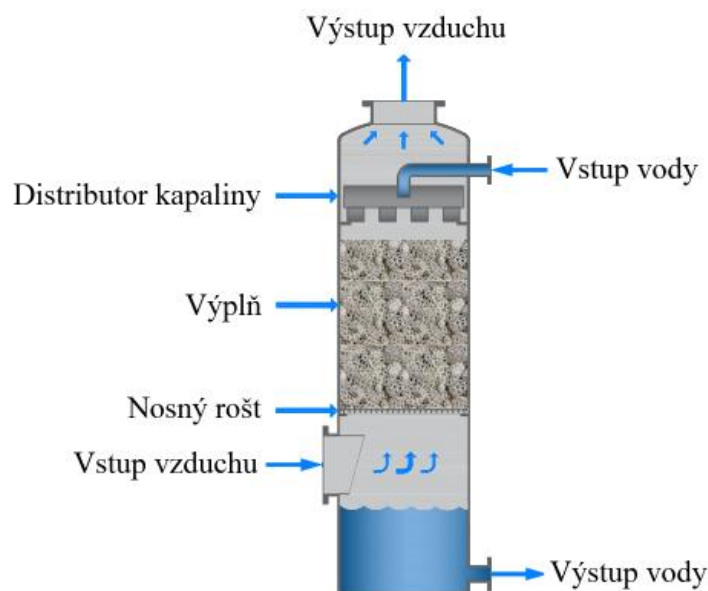
4 Konstrukční návrh

V následující kapitole bude předložen návrh konstrukce stripovací jednotky dle uvedených požadavků. Návrh byl inspirován a vychází z již existující experimentální jednotky, která se nachází v budově NETME Centre. Hlavním požadavkem na konstrukci byla především modularita a snadná výměna vnitřních komponent. Při návrhu byl také brán v potaz fakt, že jde o experimentální jednotku, tudíž se její účel může v průběhu času měnit.

Rozměry kolony byly rozšířeny bezpečnostním koeficientem, který slouží k předimenzování navrženého zařízení. Tím vznikne jistá rezerva, která by měla zamezit nežádoucím vlivům, jako je např. nepřesné měření koncentrace vstupní vody. Jak uvádí odborná literatura [13], doporučenou hodnotou tohoto koeficientu je 1,5. V tom případě by výška výplně byla 2 metry. Z důvodu omezení maximální výšky výplně na 1,5 m byl zvolen kompromis mezi tímto limitem a doporučením, tedy jako 1,3. Výška poté byla určena jako 1750 mm a průměr 300 mm. Protože je zařízení navrženo pracovat za běžných teplot a tlaků okolí, bylo možné uvažovat běžně dostupné materiály. Ty byly zvoleny na základě katalogu společnosti ARMAT, která se zabývá výrobou nerezových komponent pro potravinářský, chemický a farmaceutický průmysl.

Uvažovanou kolonu lze rozdělit na 3 hlavní sektory, přičemž jsou schematicky znázorněny na Obr. 35:

- hlavu s přívodem kapaliny a odvodem plynu,
- plášť a výplň,
- patu s přívodem plynu a odvodem kapaliny.



Obr. 35 Průřez kolonou (převzato z [73])

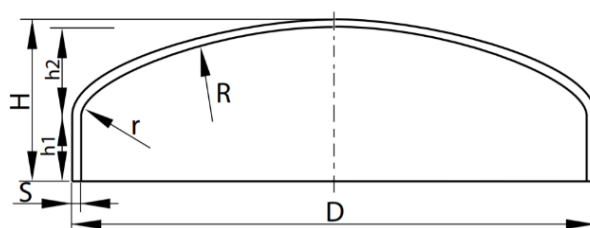
4.1 Obal kolony

Vnější součásti kolony se obvykle vyrábí z legovaných ocelí. Konkrétní volba se pak liší o zpracovávané látky. V případě amoniaku lze použít většinu kovů, jako je nerezová ocel, hliník, titan atd. Na druhou stranu není vhodné použití mědi a jejích slitin [74].

Jako vhodný kandidát na vnější konstrukci kolony byla zvolena nerezová ocel jakosti 1.4571. Jde o ušlechtilou ocel, která je díky přítomnosti molybdenu poměrně odolná vůči kyselinám, má vynikající odolnost vůči korozi a je dobře svařitelná. Své uplatnění v praxi nalézá v potravinářském, ropném nebo chemickém průmyslu. Pro konstrukci uvažovaného zařízení se tedy jeví jako vyhovující.

Pro plášť je možné využít svařovanou trubku o vnějším průměru 306 mm a tloušťce stěny 3 mm, vnitřní průměr je tedy navržených 300 mm. Hmotnost takového dílu pak činí přibližně 34 kg.

K hlavě a patě kolony byla zvolena klenutá dna DIN 28011. Jde o elipsoidní dno, které je v praxi jedním ze tří nejvyužívanějších možností. Vnější průměr této součásti je opět $D=306\text{ mm}$, stejně jako tloušťka stěny 3 mm. Schematický průřez dnem je zobrazen na Obr. 36. Klenuté dno bylo zvoleno za tím účelem, aby byla omezena akumulace tekutiny a tvoření virů v dolní, resp. horní části kolony.



$$\begin{aligned} R &= D \\ r &= 0,1 \times D \\ H &= h_1 + h_2 + S \\ h_1 &\geq 3,5 \times s \\ h_2 &= 0,1935 \times D - 0,455 \times S \end{aligned}$$

Obr. 36 Schéma klenutého dna

4.2 Vstupy a výstupy médií

Při určování průměrů potrubí na vstupu a výstupu pracovních médií není v odborné literatuře specifikována metodika postupu. Jedná se tedy spíše o technologické know-how každé společnosti. Lze nicméně využít tabelovaných hodnot pro doporučené průtoky vody a vzduchu, které jsou zobrazeny v Tab. 11, a také fakt, že distribuce plynu je tím rovnoměrnější, čím je větší průměr přívodního potrubí.

Tab. 11 Doporučené rychlosti proudění v potrubí [75]

Tekutina	Teplota [°C]	Rychlost proudění [m/s]
Voda	10 až 200	0,5 až 2,5
Vzduch	0 až 100	10 až 30

Hledaný průměr potrubí je dán jako:

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}} \quad (4.1)$$

kde:

Q	[m ³ /s]	objemový průtok pracovní látky,
v	[m/s]	rychlost proudění.

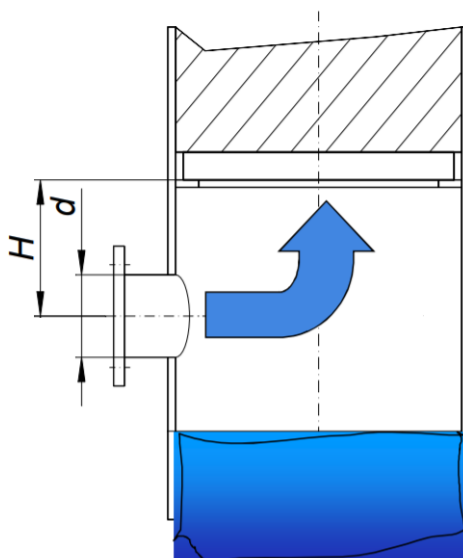
Při uvažování dolní hranice intervalu doporučených rychlostí proudění, pak pro vodu, resp. vzduch platí:

$$d_{voda} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,389 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot 0,5}} = 0,006 \text{ m} \quad (4.2)$$

$$d_{vzduch} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,105}{\pi \cdot 10}} = 0,116 \text{ m} \quad (4.3)$$

V případě potrubí na vstupu kapaliny tedy lze teoreticky uvažovat možnost jmenovité světlosti DN 6, v případě vzduchu pak DN 100, případně DN 125.

Možné způsoby přívodu plynu byly zmíněny v kapitole 2.2.3. V případě uvažované stripovací jednotky byl vybrán otevřený přívod, a to z důvodu finanční nenáročnosti a jednoduchosti konstrukce, z čehož plyne i jednoduchost údržby. V případě tohoto typu přívodu platí, vzdálenost od nosného roštu ke středu přívodního potrubí (H) musí být minimálně dvojnásobná vůči průměru právě zmíněného potrubí (d), viz Obr. 37 [36]. Součást pro přívod pracovních médií je tedy v podstatě specifický T-kus. V případě kapaliny je pak pro lepší distribuci vhodné vedení přívodu až k ose pláště, kde je zakončeno kolenem.



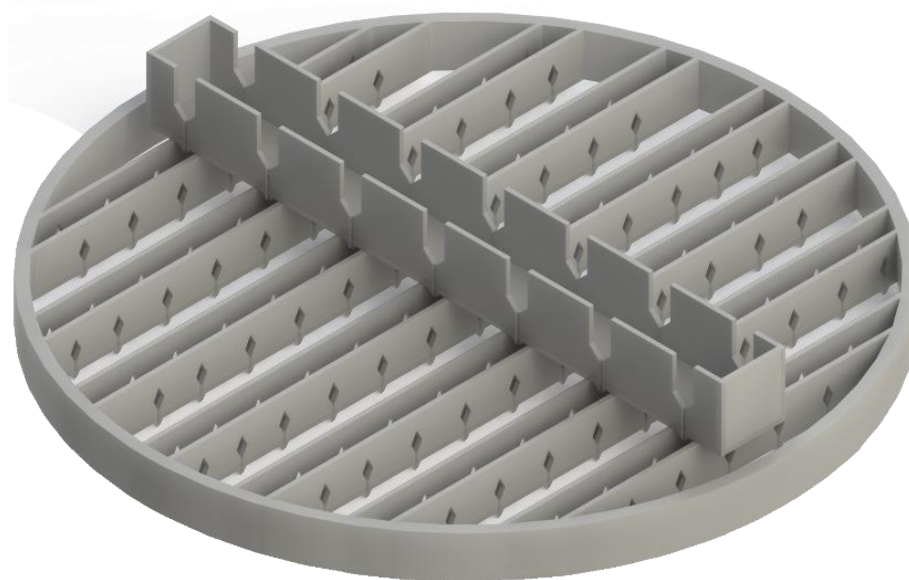
Obr. 37 Otevřený přívod vzduchu do kolony (převzato z [36])

4.3 Distributory médií

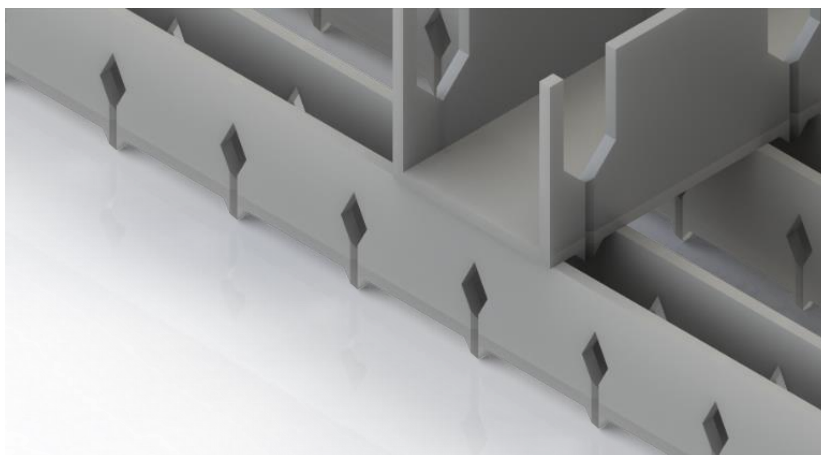
Dalšími součástmi nutnými pro správný chod kolony jsou distributory pracovních médií. Jak již bylo zmíněno v druhé kapitole, jejich hlavním cílem je rovnoměrné rozdělování kapaliny a plynu skrz celý průřez kolony.

V případě navrhované stripovací kolony se přistoupilo k v praxi stále ještě netradičnímu řešení – využití 3D tisku. Tato metoda byla zvolena především z důvodu finančních úspor. Výroba či využití dodavatele konvenčních distributorů je totiž značně nákladnější a v případě 3D tisku může být úspora velmi výrazná. Zároveň je ale nutné dbát na správný výběr tiskařského materiálu, jelikož např. v případě nylonové struny jsou náchylné k nasávání, čímž je ovlivněna i rozměrová stabilita. Je proto vhodné vyrábět součásti z materiálů, které mají nízkou nasákavost, jako je např. ABS, Flexfill TPE nebo vinyl.

V případě distributoru kapaliny byl zvolen žlabový typ, viz Obr. 38. Obecně je vhodnější spíše pro větší průměry kolon, nicméně při použité technologii výroby jde o pravděpodobně nejlepší možnost. Distributor se skládá ze dvou pater – horní patro tvoří jeden žlab, který přijímá vodu z přívodního potrubí a dále ji distribuuje do nižšího patra. To je tvořeno otvory kosočtvercového tvaru, který je uzpůsoben pro metodu výroby – v tomto případě totiž není zapotřebí během tisku využití podpor. Z každého otvoru je navíc vedena drážka, která je ukončena převisem. Je to z toho důvodu, aby kapalina proudila přímo v horizontálním směru a aby nedocházelo ke stékání až na spodní stranu žlabu. Tento detail je zobrazen na Obr. 39.



Obr. 38 Distributor kapaliny



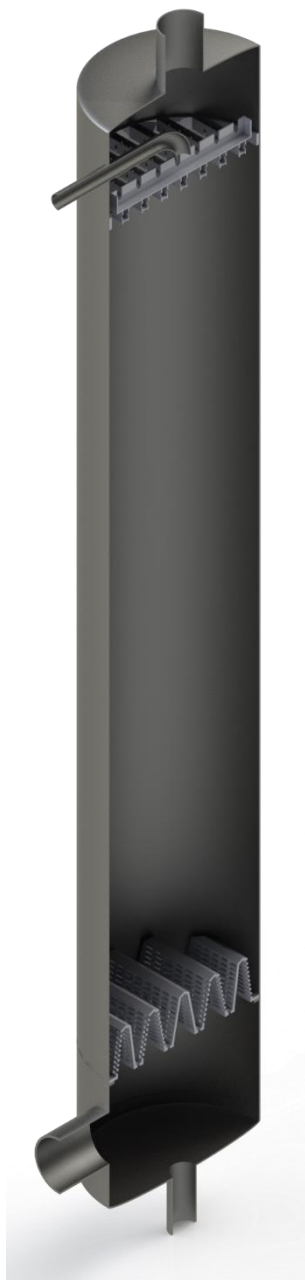
Obr. 39 Detail distributoru kapaliny

V případě distributoru plynu je zvolen typ gas injection support (viz Obr. 40), který plní funkci jak distributoru, tak i podpory výplně. Velké množství otvorů zaručuje rovnoměrné rozdělení plynu a zároveň dostatek prostoru pro stékání kapaliny.



Obr. 40 Distributor plynu

Celkové schéma stripovací kolony je zobrazeno na Obr. 41 na další straně dokumentu. Z hlediska samotné konstrukce jednotlivých částí do ucelené jednotky lze uvažovat svařování dna a T-kusů s přívodem kapaliny, resp. vzduchu. Napojení těchto segmentů k plášti je možné skrz clampové objímky. Jedná se o řešení umožňující snadnou a rychlou rozebíratelnost, a pro daný rozměr kolony jsou na trhu k dispozici. Další možností je případné přepracování na přírubové spoje, které jsou v praxi častějším řešením. Zjednodušený výkres spolu s kusovníkem jsou pak součástí přílohy.



Obr. 41 Schéma stripovací kolony

5 Závěr

Hlavním cílem diplomové práce bylo sestavení návrhového výpočtu separační jednotky pro úpravu čpavkové vody z vakuové odparky v Laboratoři energeticky náročných procesů, která je součástí NETME Centra patřícího pod Fakultu strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. K tomuto účelu byla zvolena metoda stripování – desorpce, která patří v praxi k nejpoužívanějším. Jde o proces, při kterém je kontaminovaná voda přiváděna do zařízení, ve kterém dochází ke kontaktu s čistícím plynem. V tomto případě jde o vzduch. Tím je kapalina čištěna a jednotku opouští v požadovaném stavu.

Požadavky na jednotku byly dány potřebou zpracování destilátu vznikajícího při odpařování fugátu pomocí již provozované odparky nacházející se v laboratoři. Zadáním bylo snížení koncentrace amoniaku z 3000 mg/l na 50 mg/l při průtoku 50 l/h. Omezení představovala maximální povolená výška výplně, která byla stanovena na 1,5 m. Jako pracovní podmínky byly zvoleny atmosférický tlak a teplota 25 °C.

Při sestavování výpočtové procedury bylo využito mnoha zdrojů, které uvádějí jak výpočtové vztahy, tak i různá empirická doporučení. Z toho se dá usuzovat, že řešení návrhu závisí i na přístupu a zkušenostech procesního inženýra.

Na základě sestavené výpočtové procedury založené na konceptu NTU a HTU a na základě doporučení volby různých parametrů dle literatury byla navržena kolona o výšce výplně přibližně 1,34 m a s průměrem 0,25 m.

Výrazný vliv na výsledné hodnoty měla volba výplně. Lepší parametry nabízejí výplně novějších generací, proto byl zvolen typ Raschig Super-ring velikosti 1“ z oceli. S druhem výplně souvisí tlaková ztráta, která může sloužit jako ověření správnosti či vhodnosti výběru volených parametrů. Jak uvádí odborná literatura, měla by se pohybovat v intervalu 200-400 Pa/m, přičemž při výpočtu byla stanovena ve výši 324,46 Pa/m. I v tomto ohledu tedy navržená kolona splňuje požadavky.

Takto navržené zařízení nicméně neposkytuje příliš mnoho prostoru pro zlepšení z hlediska vyšší čistoty výstupní vody. Je to především ze dvou důvodů, které jsou vzájemně provázané: vysoký poměr vzduchu ku vodě a tlaková ztráta. Vyšší poměr sice na jednu stranu zvyšuje účinnost procesu, nicméně při velmi vysokých hodnotách může dojít k zahlcení kolony. Z hlediska tlakové ztráty sice návrh je v optimálním rozmezí, nicméně již v jeho druhé polovině. Vezme-li se navíc v potaz fakt, že vybraná výplň se řadí k novější generaci, a tudíž má z hlediska efektivity a tlakové ztráty nadprůměrné výsledky, vyšší požadavky na zařízení za stanovených podmínek by byly obtížné na realizaci.

Odpovědí na případný vyšší požadavek čistoty vody na výstupu nicméně může být změna pracovních podmínek – vyšší teplota a pH, případně nižší tlak.

Seznam použitých zdrojů

- [1] TŮMA, Ivan. *MIKROBIOLOGIE (pro zahradnické obory): Díl 2. Ekologie mikroorganismů*. 1. Brno: Mendelova Univerzita v Brně, 2015. ISBN 978-80-7509-227-4.
- [2] PATTABATHULA, Venkat a Jim RICHARDSON. Introduction to Ammonia Production. In: *CEP Magazine* [online]. New York: American Institute of Chemical Engineers, 2016 [cit. 2021-02-27]. Dostupné z: <https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20160969.pdf>
- [3] Chemie a technologie sloučenin dusíku. In: *Fakulta životního prostředí* [online]. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, 2007 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt1/Chemie_a_tecnologie_sloucenin_dusiku.pdf
- [4] HLUŠEK, Jaroslav. *Dusíkatá hnojiva s dusíkem amonným a amoniakálním* [online]. In: . Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2004 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/hnojiva/mineralni/amon.htm
- [5] Amoniak. *Integrovaný registr znečišťování* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://irz.cz/node/11>
- [6] SCOTT, Alex. Ammonia on route to fuel ships and planes. *Chemical & Engineering News* [online]. 2020, **98**(31) [cit. 2021-02-27]. ISSN 0009-2347. Dostupné z: <https://cen.acs.org/energy/renewables/Ammonia-route-fuel-ships-planes/98/i31>
- [7] TULLO, Alexander H. Is ammonia the fuel of the future?. *Chemical & Engineering News* [online]. 2021, **99**(9) [cit. 2021-02-27]. ISSN 0009-2347. Dostupné z: <https://cen.acs.org/business/petrochemicals/ammonia-fuel-future/99/i9>
- [8] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 201/2012 Sb.: Zákon o ochraně ovzduší. In: *Sbírka zákonů*. 13. 6. 2012. ISSN 1211-1244.
- [9] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 415/2012 Sb.: Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: *Sbírka zákonů*. 30. 11. 2012. ISSN 1211-1244.
- [10] MALÝ, Josef a Petr HAVLÍNEK. *Čištění průmyslových odpadních vod*. Vydání 1. Brno: NOEL 2000, 1996. ISBN 80-86020-05-3.
- [11] BENITEZ, Jaime. *Principles and Modern Applications of Mass Transfer Operations*. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, 2009. ISBN 978-0470181782.
- [12] CRITTENDEN, John C., R. RHODES TRUSSELL, David W. HAND, Kerry J. HOWE a George TCHOBANOGLOUS. *MWH's Water Treatment: Principles and Design*. 3rd Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012. ISBN 978-0-470-40539-0.

- [13] HUANG, Ju-Chang a Chii SHANG. *Advanced Physicochemical Treatment Processes: Air Stripping*. Humana Press, 2006. ISBN 978-1-59745-029-4.
- [14] SEADER, J. D., Ernest J. HENLEY a D. Keith ROPER. *Separation process principles*. 3rd ed. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011. ISBN 978-0-470-48183-7.
- [15] DORAN, Pauline M. *Bioprocess Engineering Principles*. 2nd ed. Academic Press, 2013. ISBN 978-0-12-220851-5.
- [16] KUBÁČEK, Pavel. Transport látky. *Základy fyzikální chemie* [online]. Brno, 2014 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/prif/js11/fyz_chem/web/dynamika/transport.htm
- [17] CHEN, Ning Hsing a Donald F. OTHMER. New Generalized Equation for Gas Diffusion Coefficient. *Journal of Chemical&Engineering Data*. 1962, 7(1), 37-41. Dostupné z: doi:10.1021/je60012a011
- [18] FISK, Peter R., Martin G. FORD a Peter WATSON. The Kinetics of the Partitioning of Compounds Between Octanol and Water, and its Relationship to the Movement of Molecules in Biological Systems. *Comprehensive Chemical Kinetics*. 1999, , 161-194. Dostupné z: doi:10.1016/s0069-8040(99)80011-9
- [19] HAYDUK, Walter a Harry LAUDIE. Prediction of Diffusion Coefficients for Nonelectrolytes in Dilute Aqueous Solutions. *American Institute of Chemical Engineers Journal*. 1974, 20(3), 611-615.
- [20] MCCABE, Warren, Julian SMITH a Peter HARRIOTT. *Unit Operations of Chemical Engineering*. 7th Edition. Boston: McGraw Hill, 2004. ISBN 0072848235.
- [21] LI, Shainfen. *Reaction Engineering*. 1st edition. Tianjin: Butterworth-Heinemann, 2016, s. 405-444. ISBN 978-0-12-410416-7.
- [22] ONDA, Kakusaburo, Hiroshi TAKEUCHI a Yoshio OKUMOTO. Mass transfer coefficients between gas and liquid phases in packed columns. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 1968, 1(1), 56-62.
- [23] TOWLER, Gavin a Ray SINNOTT. *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*. Second Edition. USA: Elsevier, 2013. ISBN 978-0-08-096659-5.
- [24] DITL, Pavel. *Difúzně separační pochody*. 3. vydání. Praha: ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03972-4.
- [25] JURÁK, Karel a Zuzana NEJEZCHLEBOVÁ. Soustavy veličin a jednotek – Terminologie. In: *DPS Elektronika od A do Z* [online]. Liberec: CADware s.r.o., 2019 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/zajimavosti/id:61963/soustavy-velicin-a-jednotek-terminologie>

- [26] REHM, Bill, Arash HAGHSHENAS, Amir Saman PAKNEJAD a Jerome SCHUBERT. *Situational Problems in MPD. Managed Pressure Drilling*. 1st ed. USA: Gulf Publishing Company, 2009, s. 39-80. ISBN 978-1-933762-24-1.
- [27] SOUKUP, Lubomír. *Analýza proudění v potrubí kruhového i nekruhového průřezu metodou využívající rozložení hustoty vířivosti po průřezu*. Brno, 2016, 180 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.
- [28] KHARLAMOVA, Irina S., Alexander A. KHARLAMOV a Pavel VLASÁK. Model of averaged turbulent flow around cylindrical column for simulation of the saltation. *Engineering MECHANICS* [online]. 2014, **21**(2), 103-110 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Is-Kharlamova/publication/267094764_MODEL_OF_AVERAGED_TURBULENT_FLOW_AROUND_CYLINDRICAL_COLUMN_FOR_SIMULATION_OF_THE_SALTATION/links/544508c70cf2534c76605593/MODEL-OF-AVERAGED-TURBULENT-FLOW-AROUND-CYLINDRICAL-COLUMN-FOR-SIMULATION-OF-THE-SALTATION.pdf
- [29] UNUCKA, Jan. *Základy hydrauliky vodních toků* [online]. In: . Brno: Masarykova Univerzita, 2014 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/jaro2017/Z8877/um/Hydraulika_otevrenych_koryt.pdf
- [30] RAPP, Bastian E. *Microfluidics: Modeling, Mechanics and Mathematics*. 1st ed. Germany: Elsevier, 2017. ISBN 978-1-4557-3141-1.
- [31] PETERS, Max S., Klaus D. TIMMERHAUS a Ronald E. WEST. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. 5th ed. USA: McGraw-Hill, 2003. ISBN 0-07-239266-5.
- [32] BAHRAMI, Majid, Samyar ZABIHI, Mahdi GOUGOL, Hamid Abdoli HOSEINABADI, Sahar JAMSHIDIAN, Maryam ADIMI a Mahboubeh PISHNAMAZI. Process Design of Ammonia Separation for Nitrification Control in Aeration Basins at an IKORC's Oily Wastewater Treatment Unit. *ACS Omega* [online]. 2020, **5**(34), 21883–21896 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.0c03067>
- [33] *Random packing: From competitive products to advanced solutions*. Sulzer, 2019. Dostupné také z: https://www.sulzer.com/-/media/files/products/separation-technology/distillation-and-absorption/brochures/random_packing.ashx?la=en
- [34] What is ammonia NH₃ & NH₄?. In: *Seneye* [online]. Norwich, 2018 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: https://answers.seneye.com/en/water_chemistry/what_is_ammonia_NH3_NH4
- [35] ICARUS. *ICARUS Reference: Towers, Columns*. 3rd ed. USA, 1998. Dostupné také z: <https://instruct.uwo.ca/engin-sc/cbe497/Doc/Icarus/ir08.pdf>

- [36] CASAS, Nathalie. *Separation Columns in Practice* [online]. In: . Zürich: ETH Zürich, 2017 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://docplayer.net/55323702-Separation-columns-in-practice-sulzer-chemtech.html>
- [37] SKOGESTAD, Sigurd. Absorption/Stripping. In: *NTNU* [online]. Trondheim, 2017 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://folk.ntnu.no/skoge/septek/lectures/septek-sis3-absorption.pdf>
- [38] HYNDMAN, Caroline L., Faïçal LARACHI a Christophe GUY. Understanding gas-phase hydrodynamics in bubble columns: a convective model based on kinetic theory. *Chemical Engineering Science* [online]. 1997, **52**(1), 63-77 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250996003879>
- [39] HILLS, J. H. The operation of a bubble column at high throughputs: I. Gas holdup measurements. *The Chemical Engineering Journal* [online]. 1976, **12**(2), 89-99 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0300946776870025>
- [40] BOUAIFI, Mounir, Gilles HEBRARD, Dominique BASTOUL a Michel ROUSTAN. A comparative study of gas hold-up, bubble size, interfacial area and mass transfer coefficients in stirred gas-liquid reactors and bubble columns. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* [online]. 2001, **40**(2), 97-111 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S025527010000129X>
- [41] DUSS, Markus a Ross TAYLOR. Predict Distillation Tray Efficiency. In: *American Institute of Chemical Engineers* [online]. 2018 [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2018/july/predict-distillation-tray-efficiency>
- [42] PERRY, Robert H. a Don W. GREEN. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8. USA: McGraw-Hill, 2007. ISBN 0-07-159313-6.
- [43] CHUANG, K. T. a K. NANDAKUMAR. Tray Columns: Design. *Encyclopedia of Separation Science*. 1st ed. Macclesfield: Academic Press, 2000, s. 1135-1140. ISBN 978-0-12-226770-3.
- [44] *KEMPRO* [online]. France [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <http://kempro.eu/>
- [45] Tray Design and Construction. In: *Hanbit Soltech Corporation* [online]. Korea [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: http://www.hstco.kr/01/02_03.php
- [46] HEBERT, Scott a Neil SANDFORD. Consider Moving to Fixed Valves. *CEP Magazine* [online]. 2016, **13**(5), 34-41 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2016/may/consider-moving-fixed-valves>

- [47] RICHARDSON, J. F., J. H. HARKER a J. R. BACKHURST. Distillation. *Chemical Engineering*. 5th ed. Great Britain: Butterworth-Heinemann, 2003, s. 542-655. ISBN 978-0-08-049064-9.
- [48] Distillation Column Internals. In: *Wermac* [online]. Werner Sölken [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: http://www.wermac.org/equipment/distillation_part2.html
- [49] REPPICH, Marcus. *Conceptual Design of Distillation, Absorption and Stripping Systems*. [přednáška]. Brno, 2020.
- [50] CHATTOPADHYAY, Prithvijit. *Absorption & Stripping*. 1st ed. New Delhi: Asian Books Private Limited, 2007. ISBN 978-81-8412-033-2.
- [51] MÍKA, Vladimír. *Chemické inženýrství II*. 2. přeprac. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. ISBN 80-7080-359-2.
- [52] RAUTENBACH, Christo. *Modelling of flow through porous packing elements of a CO2 absorption tower*. South Africa, 2009. Diplomová práce. University of Stellenbosch.
- [53] Evolution in random tower packings. *MACH Engineering* [online]. Houston [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.machengineering.com/evolution-in-random-tower-packings/>
- [54] SCHULTES, Michael. Raschig Super-Ring: A New Fourth Generation Packing Offers New Advantages. *Chemical Engineering Research and Design*. 2003, **81**(1), 48-57.
- [55] JAEGER PRODUCTS, inc. *Air Stripping of VOCs from Water*. Texas, 2006, 19 s. Dostupné také z: <https://web.archive.org/web/20110724225451/http://www.jaeger.com/Brochure/airstripping.pdf>
- [56] HAND, David W., John C. CRITTENDEN, Joseph L. GEHIN a Benjamin W. LERKINS JR. Design and Evaluation of an Air-Stripping Tower for Removing VOCs From Groundwater. *Journal - American Water Works Association*. 1986, **78**(9), 87-97. Dostupné z: doi:10.1002/j.1551-8833.1986.tb05815.x
- [57] STRIGLE JR., Ralph F. *Packed Tower Design and Applications: Random and Structured Packings*. 2nd ed. Houston: Gulf Publishing, 1994. ISBN 0-88415-179-4.
- [58] SULZER. *Internals for packed columns*. Switzerland. Dostupné také z: https://www.sulzer.com/-/media/files/products/separation-technology/distillation-and-absorption/brochures/internals_for_packed_columns.ashx?la=en
- [59] Model TS834, TS844 Random Packing Gas-Injection Support. In: *Koch-Glitsch* [online]. Kansas [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://koch-glitsch.com/Products/Packing-and-Internals/tower-internals/plastic-packed/support-plates/Model-TS834,-TS844-Random-Packing-Gas-Injection-Su>

- [60] ODLUČOVAČE KAPEK, DEMISTERY. *ZOMApplast* [online]. Přerov, 2021 [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://www.zomaplast.cz/absorbery/odlucovace-kapek-demistry>
- [61] SULZER. *Gas/Liquid Separation Technology*. Switzerland, 2018. Dostupné také z: https://www.sulzer.com/-/media/files/products/separation-technology/feed-inlet-devices/gas_liquid_separation_technology.ashx?la=en
- [62] RICHTER, Miroslav a Otakar SÖHNEL. *Průmyslové technologie III: Stroje a zařízení chemického průmyslu*. 1. vyd. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně v Ústí n. Labem, Fakulta životního prostředí, 2013. ISBN 978-80-7414-827-9.
- [63] DEMISTER Mist Eliminator (Traditional Style). *Koch-Glitsch* [online]. Kansas [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://www.koch-glitsch.com/Products/Mist-Elimination/DEMISTER-Mist-Eliminator-TS>
- [64] Bed Limiter for Random Packing. In: *Munters* [online]. Sweden [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://www.munters.com/cs/munters/products/mass-transfer/bed-limiter-for-random-packing/>
- [65] SANDER, Rolf. Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015, **15**(8), 4399-4381. Dostupné z: doi:10.5194/acp-15-4399-2015
- [66] NAZAROFF, William W. a Lisa ALVAREZ-COHEN. *Environmental Engineering Science*. 1st ed. New York: Wiley, 2000. ISBN 978-0-471-14494-6.
- [67] TÖLG, Tomáš. *Fyzikální praktikum*. 6. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-829-9.
- [68] STREET, Robert L., Gary Z. WATTERS a John K. VENNARD. *Elementary Fluid Mechanics*. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. ISBN 978-0-471-01310-5.
- [69] CENGEL, Yunus A. *Heat and Mass Transfer: A Practical Approach*. 3rd ed. Singapore: McGraw Hill, 2006. ISBN 007-125739-X.
- [70] MELLOR, Malcolm. *Phase Composition of Pore Water in Cold Rocks*. New Hampshire, 1970.
- [71] STREATFEILD, M. H., C. HENDERSON, L. A. K. STAVELEY, A. G. M. FERREIRA, I. M. A. FONSECA a L. Q. LOBO. Some thermodynamic properties of liquid ammonia and trideuteroammonia. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 1987, **19**(11), 1163-1171. Dostupné z: doi:10.1016/0021-9614(87)90054-1
- [72] SPILLER, Lester L. Determination of Ammonia/ Air Diffusion Coefficient Using Nafion Lined Tube. *Analytical Letters*. 1989, **22**(11-12), 2561-2573. Dostupné z: doi:10.1080/00032718908052375

- [73] Air Strippers for water purification. In: *Branch Environmental Corp.* [online]. Somerville, New Jersey, 2020 [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://www.branchenv.com/air-strippers/>
- [74] Proč je pro měď a její slitiny běžná koroze amoniaku?. In: *LKALLOY* [online]. Čína, 2018 [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://lkalloy.com/cs/why-ammonia-corrosion-are-common-for-copper-and-its-alloys/>
- [75] MIKULA, Julius. *Potrubí a armatury*. 2. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1974.

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Rozměr	Veličina
a	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$	vlastní specifický povrch náplně
a_h	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$	hydraulický specifický povrch náplně
a_w	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$	smočený specifický povrch náplně
A	m^2	mezifázová plocha, plocha průřezu kolony
A'	-	konstanta Antoineovy rovnice
B'	-	konstanta Antoineovy rovnice
c	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	střední rychlost
C	$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$	molární hustota
C_h	-	konstanta výplně
C_p	-	konstanta výplně
C_L	-	konstanta výplně
C_S	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	kapacitní konstanta
C'	-	konstanta Antoineovy rovnice
d_{voda}	m	průměr vstupního potrubí pro vodu
d_{vzduch}	m	průměr vstupního potrubí pro vzduch
d_h	m	hydraulický průměr
d_p	m	velikost výplně
d'_p	m	efektivní velikost výplně
D	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	difuzní koeficient
D_{min}	m	minimální průměr kolony
D_H	m	hydraulická hloubka
f	-	úroveň zahlcení kolony
f^*	Pa	fugacita
F	$\text{Pa}^{0,5}$	faktor F
F_p	$\text{ft}^2 \cdot \text{ft}^{-3}$	faktor výplně
Fr	-	Froudeho číslo
g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	gravitační zrychlení
G	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	průtok plynu
G^*	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	průtok plynu
G'	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	hmotnostní průtok plynu
h_L	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	zádrž kapaliny
H	-	Henryho konstanta obecně
H°	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	změna entalpie
J	$\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	difuzní tok
k	-	konstanta Van't Hoffova vztahu
k_G	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	parciální koeficient přestupu hmoty pro plynou fázi
k_L	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	parciální koeficient přestupu hmoty pro kapalnou fázi
K	-	Henryho konstanta těkavosti
K_G	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	celkový koeficient prostupu hmoty pro plynou fázi
K_L	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	celkový koeficient prostupu hmoty pro kapalnou fázi
K_W	-	faktor stěny
l	m	charakteristická délka
L	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	průtok kapaliny
L^*	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	průtok kapaliny

L'	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	hmotnostní průtok kapaliny
m	-	směrnice rovnovážné křivky
M	$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$	molární hmotnost
N	$\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$	molární tok
p	kPa, atm	tlak
p*	kPa	tenze par
Q	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	objemový průtok pracovní látky
R	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	univerzální plynová konstanta
Re	-	Reynoldsovo číslo
S	-	stripovací faktor
T	K	teplota
v	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	rychlost proudění
v _{GF}	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	kritická rychlost proudění plynu při zahlcení
V _D	$\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$	molární objem
We	-	Weberovo číslo
x	-	molární zlomek, kapalina
X	-	relativní molární zlomek, souřadnice Eckertova diagramu
y	-	molární zlomek, plyn
Y	-	relativní molární zlomek, souřadnice Eckertova diagramu
z	m	vzdálenost od mezifázového rozhraní
Z	m	výška výplně
ΔP	Pa	tlaková ztráta
ΔP_0	Pa	suchá tlaková ztráta
ε	-	mezerovitost
δ	-	distribuční koeficient
μ	cP, Pa·s	dynamická viskozita rozpouštědla
μ_{cp}	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	chemický potenciál
Φ_S	-	konstanta rozpouštědla
ψ_0	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	koeficient odporu suché výplně
ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota
σ	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	povrchové napětí
σ'	A	kolizní průměr
$\Omega(1,1)^*$	-	kolizní integrál

Dolní index	Význam
-------------	--------

A	složka A směsi
B	složka B směsi
F	finální, zahlcení
G	plyn
i	fázové rozhraní
I	iniciální
L	kapalina
s	rozpouštědlo

Zkratka	Význam
---------	--------

CO ₂	oxid uhličitý
H ₂ SO ₄	kyselina sírová

HTU	Height of Transfer Unit, výška prenosové jednotky
NH ₃	amoniak
NH ₄ ⁺	amonný kation
NH ₄ NO ₃	dusičnan amonný
(NH ₄) ₂ SO ₄	síran amonný
NO _x	souhrnné označení oxidů dusíku
NTU	Number of Transfer Units, počet prenosových jednotek
pH	vodíkový exponent
PE	polyethylen
PP	polypropylen
PVC	polyvinylchlorid
PVDF	polyvinylidenfluorid

Seznam obrázků

Obr. 1 Srovnání Raoultova a Henryho zákona [12]	10
Obr. 2 Průběh koncentrace v plynné fázi	14
Obr. 3 Grafická interpretace filmového modelu [21]	14
Obr. 4 Rovnovážná křivka a zobrazení hnacích sil [11]	15
Obr. 5 Rychlostní profily proudění [28]	17
Obr. 6 Rovnovážná křivka s celkovými rozdíly koncentrací [11]	20
Obr. 7 Bilance stripovací kolony	21
Obr. 8 Vzájemná poloha rovnovážné křivky a pracovní přímky při stripování	22
Obr. 9 Porovnání pracovních přímek stripovací kolony	23
Obr. 10 Rovnovážné stupně procesu	24
Obr. 11 Závislost NTU na relativní koncentraci a stripovacím faktoru [12]	25
Obr. 12 Křivky tlakových ztrát [33]	26
Obr. 13 Eckertova korelace tlakové ztráty [12]	26
Obr. 14 Zastoupení disociované a nedisociované formy v závislosti na pH, upraveno dle [34]	28
Obr. 15 Rozpustnost amoniaku v závislosti na teplotě [13]	28
Obr. 16 Typy kolon [37]	29
Obr. 17 Režimy proudění v probublávané koloně [40]	30
Obr. 18 Obecné schéma patrové kolony (upraveno dle [41])	30
Obr. 19 Možná vnitřní uspořádání patrových kolon [42]	31
Obr. 20 Sítové patro [44]	31
Obr. 21 Možné podoby elementů ventilových pater [45]	32
Obr. 22 Ventilové patro [44]	32
Obr. 23 Kloboučkové patro [48]	33
Obr. 24 Patro se spádovou a přepadovou částí obdélníkového výřezu [42]	34
Obr. 25 Strukturované výplně [52]	34
Obr. 26 Vývoj elementů sypaných výplní	35
Obr. 27 Základní druhy distributorů [42]	37
Obr. 28 Způsoby přívodu plynu a) otevřený, b) cyklonový, c) rozstříkový, d) trubkový, e) lamelový [58]	38
Obr. 29 Nosný rošt typu gas injection [59]	38
Obr. 30 Příklady profilů lamelového odlučovače [61]	39
Obr. 31 Pletený odlučovač kapaliny [63]	39
Obr. 32 Záchytné zařízení pro sypané výplně [64]	40
Obr. 33 Závislost stripovacího faktoru na NTU	42
Obr. 34 Návrhový výpočet v rozhraní Excel	50
Obr. 35 Průřez kolonou (převzato z [73])	51
Obr. 36 Schéma klenutého dna	52
Obr. 37 Otevřený přívod vzduchu do kolony (převzato z [36])	53
Obr. 38 Distributor kapaliny	54
Obr. 39 Detail distributoru kapaliny	54
Obr. 40 Distributor plynu	55
Obr. 41 Schéma stripovací kolony	56

Seznam tabulek

Tab. 1 Základní parametry amoniaku [1]	5
Tab. 2 Povinnosti provozovatele zdroje [9]	7
Tab. 3 Specifické emisní limity amoniaku	8
Tab. 4 Povrchová napětí smáčivosti	16
Tab. 5 Porovnání pater dle vybraných parametrů (převzato z [49])	33
Tab. 6 Porovnání druhů výplní dle vybraných parametrů (převzato z [49])	36
Tab. 7 Vstupní parametry stripovací jednotky	41
Tab. 8 Převodní veličiny pro Henryho konstanty [65]	41
Tab. 9 Výběr parametrů výplně Raschig Super-rings, upraveno dle [14]	44
Tab. 10 Parametry navržené kolony	49
Tab. 11 Doporučené rychlosti proudění v potrubí [75]	52

Seznam příloh

Příloha 1 Sestava kolony.pdf